Dipl.-Ing. Vivien Gisela Schlüter

Entwicklung eines experimentell gestützten Bewertungsverfahrens zur Optimierung und Charakterisierung der Dehnungsübertragung oberflächenapplizierter Faser-Bragg-Gitter-Sensoren

BAM-Dissertationsreihe · Band 56
Berlin 2010

Die vorliegende Arbeit entstand an der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.

Impressum

Entwicklung eines experimentell gestützten Bewertungsverfahrens zur Optimierung und Charakterisierung der Dehnungsübertragung oberflächenapplizierter Faser-Bragg-Gitter-Sensoren

2010

Herausgeber:
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
Telefon: +49 30 8104-0
Telefax: +49 30 8112029
E-Mail: info@bam.de
Internet: www.bam.de

Copyright © 2010 by
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Layout: BAM-Arbeitsgruppe Z.64

ISSN 1613-4249
ISBN 978-3-9813346-7-8

Entwicklung eines experimentell gestützten Bewertungsverfahrens zur Optimierung und Charakterisierung der Dehnungsübertragung oberflächenapplizierter Faser-Bragg-Gitter-Sensoren

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Vivien Gisela Schlüter

von der Fakultät V Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Utz von Wagner
1. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang H. Müller
2. Gutachter: Dr.-Ing. Wolfgang R. Habel
3. Gutachter: Dr.-Ing. Peter Deimel

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 27. November 2009

Berlin 2010

D83

Vorwort der Verfasserin

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in der Fachgruppe VIII.1, Mess- und Prüftechnik; Sensorik. In dieser Fachgruppe werden Untersuchungen zur Zuverlässigkeitsbeurteilung, Validierung und Kalibrierung von Sensoren unterschiedlichster Funktionsprinzipien und Mess- und Prüfsystemen durchgeführt. Diese Arbeit basiert auf einem gemeinsamen Kooperationsprojekt mit dem Forschungszentrum EADS Innovation Works (IW) in Ottobrunn.

Mein besonderer Dank gilt daher Herrn Dr. Peter Deimel von EADS IW für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit, die Unterstützung durch Bereitstellen von Probekörpern und die vielen wissenschaftlichen Anregungen. Herrn Martin Bach von Airbus danke ich für die organisatorische Unterstützung und die zahlreichen bereitgestellten Proben.

Herrn Prof. Dr. Wolfgang Müller von der TU Berlin danke ich für die wissenschaftliche Betreuung und die Übernahme des Referats.

Mein besonderer Dank gilt meinem Arbeitsgruppenleiter Herrn Dr. Wolfgang Habel, der das gemeinsame Kooperationsprojekt mit EADS initiiert und damit diese Arbeit erst möglich gemacht hat. Herrn Dr. Werner Daum als Fachgruppenleiter danke ich für die mir dargebotenen Möglichkeiten und Unterstützungen bei Investitionen in Messgeräte und Prüfmaschinen. Allen meinen lieben Kollegen aus der Arbeitsgruppe „Faseroptische Sensorik“ und der Fachgruppe möchte ich herzlich für die Unterstützungen, Fachgespräche und Hilfestellungen danken. Insbesondere danke ich Herrn Detlef Hofmann, Herrn Frank Basedau und Herrn Matthias Schallert für die vielen freundschaftlichen Ratschläge und Diskussionen. Den Kollegen der Abteilung V der BAM möchte ich danken für die freundliche Unterstützung durch die Nutzung ihrer Prüfmaschinen. Besonders möchte ich mich noch bei der Arbeitsgruppe VIII.13, vor allem bei Herrn Klaus-Peter Gründer und Herrn Daniel Kadoke, für die sehr gute Zusammenarbeit beim Aufbau des Messplatzes, die zahllosen durchgeführten Messungen, und den vielen guten Ratschlägen und Ideen bedanken.

Mein persönlicher Dank gilt vor allem auch meinem Freund und meiner Familie, die mich stets unterstützt und mir den notwendigen Rückhalt gegeben haben.

Zusammenfassung

Faser-Bragg-Gitter (FBG) werden als Dehnungssensoren zur Bestimmung der Bauteilverformung dort eingesetzt, wo herkömmliche elektrische Dehnungsmesstechnik an ihre Grenzen stößt (z. B. im Hochspannungsbereich, bei starken elektromagnetischen Feldern, in der Medizintechnik, in sicherheitsrelevanten und strahlungsbelasteten Bereichen). Die Applizierung dieser Sensoren auf Oberflächen verschiedener Materialien und die Qualifizierung der FBG als Dehnungssensoren sind Gegenstand dieser Arbeit. Bisher ist für oberflächenapplizierte FBG-Dehnungssensoren kein geprüftes und zertifiziertes Applizierungsverfahren bekannt. Die Bestimmung der Dehnungsübertragung und die Definition eines Dehnungsübertragungskoeffizienten aus der Änderung der Bragg-Wellenlänge in Relation zur Dehnung des Messobjekts sind bisher mit keinem experimentellen Prüfverfahren validiert worden. Diese Arbeit behandelt die Entwicklung einer Messmethodik zur Bestimmung der Dehnungsübertragung zwischen Messobjekt und FBG-Dehnungssensor durch ein physikalisch unabhängiges optisches Referenzverfahren. Die auf die Dehnungsübertragung Einfluss nehmenden Parameter wurden zunächst experimentell quantifiziert und die Wellenlängenänderung der FBG-Dehnungssensoren in Relation zur Dehnungsmessung mit Dehnungsmessstreifen analysiert. Einige Werkstoffkennwerte der eingesetzten Klebstoffe wurden bestimmt.

Auf Basis dieser Untersuchungen wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Prüfeinrichtung für oberflächenapplizierte FBG-Dehnungssensoren aufgebaut. Die Funktionsfähigkeit der Messmethodik wird aufgezeigt. Untersuchungen, die die Charakterisierung der Prüfeinrichtung und die Validierbarkeit von FBG-Dehnungssensoren durch die hier entwickelte Messmethode zum Ziel haben, sind in dieser Arbeit begonnen worden.

Für den Spezialfall der Dehnungsermittlung an einem Rotorblatt sind oberflächenapplizierbare FBG-Patches entwickelt und ihr charakteristisches Verhalten untersucht worden. Es wurde zusätzlich eine Integrationstechnik für FBG-Dehnungssensoren während der Rotorblattherstellung entwickelt.

Als ersten Schritt in Richtung Standardisierung der zu prüfenden Kenngrößen bei der Ermittlung der Dehnungsübertragung und der Spezifizierung von Einfluss nehmenden Parametern auf den Dehnungsübertragungskoeffizienten ist unter Mitwirkung der Autorin dieser Arbeit eine Richtlinie für den Umgang mit oberflächenapplizierten FBG-Dehnungssensoren entstanden.

Abstract

Fibre Bragg Gratings (FBG) as strain sensors are implemented in those areas, where conventional electrical strain gauges reach their limits (for example in areas of high voltage, strong electro-magnetic fields, medical technology, safety relevant and radiation-exposed areas). Subject of this work is the surface application and the qualification of these sensors as strain sensors on different materials. A certified and proven method of application for surface mounted sensors is not known yet. The determination of the strain transfer and the definition of a strain transfer factor out of the relation between the Bragg wavelength change and the strain of the specimen have not yet been validated experimentally with an independent validation method. The development of an experimental methodology using a physically independent optical reference method for the determination of the strain transfer between the specimen and the FBG strain sensor is the main focus of this work. The influencing parameters on the strain distribution have been quantified experimentally and the change in Bragg wavelength has been investigated in relation to the strain measured by strain gauges. The material properties of the adhesives have been partly investigated.

On the basis of these experiments a testing facility for surface applied FBG strain sensors has been developed. The functionality of the experimental methodology for the determination of the strain factor has been shown. The characterisation of the testing facility and the validity of FBG strain sensors through the experimental methodology inhere developed have been started.

For the case of the strain determination in wind turbine rotor blades specially adapted FBG patches have been developed and qualified. An integration technique for FBG strain sensors into the rotor blade has been developed as well.

As a first step of standardizing this measurement technique a national standard has been developed under the contribution of the author.

Inhaltsverzeichnis

I Einleitung und Grundlagen 1

I.1 Motivation und Zugang zur Problemstellung 1

I.1.1 Faser-Bragg-Gitter in der Luftfahrtindustrie 1

I.1.2 Bedeutung der Zuverlässigkeit oberflächenapplizierter FBG-Dehnungssensoren 2

I.1.3 Untersuchungsgegenstand und Zielsetzung 4

I.1.4 Aufbau der Arbeit 4

I.2 Messtechnische Grundlagen 5

I.2.1 Dehnungsmessstreifen 5

I.2.1.1 Dehnungsübertragungsmodell DMS 6

I.2.1.2 Grenzen von DMS und DMS-Messtechnik 8

I.2.2 Funktionsweise von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren 9

I.2.2.1 Aufbau und Eigenschaften von Lichtwellenleitern 9

I.2.2.2 Prinzip Faser-Bragg-Gitter 11

I.2.2.3 Spektral-optische Phänomene 15

I.2.2.4 Coating in der Funktion des Dehnungsübertragers 18

I.2.2.5 FBG-Messtechnik und Signalauswertung 21

I.2.2.6 Dehnungssensoren basierend auf Faser-Bragg-Gitter 25

I.2.3 Dehnungsübertragungsmodell FBG 26

I.2.3.1 Einfluss nehmende Parameter auf die Dehnungsübertragung nach dem Dehnungsübertragungsmodell 32

I.2.4 Klebstoffe und Adhäsion 35

I.2.4.1 Grundlagen der Adhäsion 35

I.2.4.2 Übersicht über Klebstoffe und Primer 36

I.2.4.3 Acrylat- und Epoxidharz-Klebstoffe 37

I.2.4.4 Herstellung von Klebverbindungen 37

I.2.4.5 Eigenschaften von Klebverbindungen 38

I.3 Validierung 40

II Untersuchung Einfluss nehmender Parameter auf die Dehnungsübertragung zur Entwicklung einer Validierungsmethodik 42

II.1 Ermittlung von Klebstoffkennwerten 42

II.1.1 Bestimmung des E-Moduls 44

II.1.2 Bestimmung des thermischen Verhaltens 47

II.2 Bestimmung von Klebstoffschichtdicken 54

II.3 Temperatur- und Dehnungsentkopplung bei FBG-Sensoren ... 56
II.4 Ermittlung des Dehnungsübertragungskoeffizienten unter statischer Belastung ... 58
II.5 Relative Feuchte ... 67

III Validierungsmessplatz KALFOS ... 69
III.1 Konzipierung und Entwicklung eines Prüfverfahrens ... 69
III.1.1 Messmethodik und Auswahl des Referenzverfahrens ... 69
III.1.1.1 Dehnungsmessung mit 3D-Stereokorrelation als Referenz ... 70
III.1.1.2 Referenzverfahren 3D-ESPI ... 77
III.1.2 Anforderungen an die Prüfeinrichtung ... 84
III.1.3 Datenverarbeitung und Programmierung ... 88
III.1.4 Nutzungsprofil des Messplatzes KALFOS ... 89
III.2 Charakterisierung der Prüfeinrichtung ... 94
III.2.1 Messunsicherheit ... 94
III.2.2 Optimierung des Messplatzes ... 97

IV FBG-Dehnungssensoren als Patches ... 100
IV.1 Kommerzielle Patches ... 100
IV.2 Patches zur Oberflächenapplizierung ... 101
IV.2.1 Konzept und Aufbau ... 101
IV.2.2 Funktionsnachweis ... 102
IV.3 Integrationsbeispiel für FBG-Dehnungssensoren ... 108
IV.4 Weiterführende Untersuchungen ... 111

V Empfehlung zur Applizierung mit optimaler Dehnungsübertragung ... 112

VI Zusammenfassung und Ausblick ... 113

VII Literaturverzeichnis ... 116

VIII Abbildungsverzeichnis ... 121

IX Abkürzungen und Formelzeichen ... 125
IX.1 Abkürzungen ... 125
IX.2 Formelzeichen ... 126

A Anhang 129

A.1 Experimentell ermittelte Dehnungsübertragungskoeffizienten aus kombinierten Last-Temperatur-Versuchen (vgl. Abschnitt II.4) 129

A.1.1 Verklebungsart: Vollflächig 129

A.1.2 Verklebungsart: Punktuell 130

A.1.3 Vergleich der Dehnungsübertragungskoeffizienten ermittelt mit DMS und 3D-Stereokorrelation (vgl. Abschnitt III.1.1.1) 131

A.2 Mathematische Darstellung des Brechungsindexes 132

A.3 Pockel-Koeffizienten 135

Lebenslauf 137

I Einleitung und Grundlagen

Faseroptische Messtechnik wird aufgrund einer Vielzahl von Vorteilen bereits in verschiedenen Industriezweigen eingesetzt. Dabei zeichnen sich faseroptische Sensoren gegenüber konventioneller Messtechnik durch Charakteristika wie z. B. Immunität gegenüber elektromagnetischen Feldern aus. Zudem können faseroptische Sensoren in Glasfasern bei hohen thermischen Beanspruchungen (bis ca. 700 °C) eingesetzt werden und sind sowohl für die Oberflächenapplizierung als auch die Integration in Verbundwerkstoffen geeignet. Neben ihrer kleinen Geometrie haben diese optischen Sensoren den Vorteil, dass mehrere Sensoren basierend auf unterschiedlichen Funktionsprinzipien gleichzeitig aus einer optischen Faser ausgelesen werden können (multiplexen). Dies macht optische Sensoren für bestimmte Industriezweige, z. B. die Luft- und Raumfahrtindustrie, die Medizintechnik oder den Ingenieurbau, attraktiv.

Damit die faseroptische Messtechnik ihre enormen Vorteile gegenüber konventioneller, etablierter Messtechnik ausspielen kann, muss zum einen von den Herstellern und Anbietern die Kommerzialisierung und Verbreitung durch Fortentwicklung der Technik und Senkung der Kosten vorangebracht werden. Zum anderen müssen für die Anwendung der faseroptischen Messtechnik verbindlich Handhabungsvorschriften, Richtlinien und Prüfmethodiken geschaffen werden. Für den Einsatz dieser Messtechnik in sicherheitsrelevanten Industriezweigen, z. B. der Luftfahrt oder Medizintechnik, ist es von grundlegender Bedeutung, die faseroptischen Sensoren und deren Messtechnik nach vergleichbaren Kriterien mit einer physikalisch unabhängigen Prüfmethodik zu bewerten.

I.1 Motivation und Zugang zur Problemstellung

I.1.1 Faser-Bragg-Gitter in der Luftfahrtindustrie

Die Bedeutung von faseroptischen Sensoren und Netzwerken in der Luftfahrt ist in den letzten Jahren sehr stark gestiegen. Diese Sensoren und Systeme sollen ähnlich einem menschlichen Nervensystem eine Online-Diagnose, eine Prognose und damit ein gezieltes Management des Flugzeugzustands ermöglichen. Durch die autonome Detektion, Beurteilung und Überwachung der Struktur bis hin zur Ereignismeldung des Messsystems sollen damit Wartungsintervalle eingespart und Inspektionskosten gesenkt werden.

Eine besondere Rolle unter den faseroptischen Sensoren spielen die Faser-Bragg-Gitter-Sensoren (FBG-Sensoren). Mehrfach sind in der Literatur bereits Ergebnisse vorgestellt worden, bei denen FBG-Sensoren sowohl in Luftfahrtkomponenten integriert als auch auf ihrer Oberfläche appliziert wurden [Keh03], [NTak07], [Stak07], [Tru01].

FBG-Sensoren können durch Integration in Faserverbundwerkstoff-Bauteilen bereits zur Überwachung des Herstellungsprozesses eingesetzt werden, z. B. zur Temperatur-, Druck- oder Epoxidharz-Durchflussmessung während der komplex ablaufenden Vorgänge bei der Aushärtung dieser Bauteile. Von der Herstellung über die Qualifikationsphase des Bauteils bis zur Strukturüberwachung komplexer Bauteilgruppen können somit wertvolle Informationen über das Material und dessen Verhalten unter Beanspruchung gewonnen werden. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse über das Materialdesign, dessen Qualität und das Strukturverhalten können wichtige Aussagen über die Wieder- und Weiterverwendbarkeit des Materials getroffen werden.

Im Gegensatz zur Integration von FBG-Sensoren bieten oberflächenapplizierte FBG-Sensoren wesentliche Vorteile. Oberflächenapplizierte FBG-Sensoren werden ähnlich Dehnungsmessstreifen (DMS) zur Strukturüberwachung auf die Oberfläche von Luftfahrtkomponenten appliziert. Das schon fertige und qualifizierte Faserverbundwerkstoff-Bauteil muss nicht konstruktiv durch die Einbettung von Sensoren modifiziert werden. Auch im Herstellungsprozess müssen keine neuen Techniken zur Einbindung und zum Schutz der Sensoren in das Bauteil vorgesehen werden. Dies bedeutet, dass dem Hersteller von Luftfahrtkomponenten im Gegensatz zur integrierten Sensorik durch oberflächenapplizierte Sensoren ein erheblich geringerer zusätzlicher Arbeitsaufwand und entsprechend geringere zusätzliche Kosten entstehen.

In der Luftfahrt wird bei der Intervall-Wartung von Flugzeugen die Integrität von Flugzeugkomponenten mittels klassischer zerstörungsfreier Prüfverfahren (z. B. Thermographie, Sichtinspektion oder Ultraschall) untersucht. Dagegen bietet die FBG-Messtechnik den großen Vorteil, dass die Struktur des Flugzeugs kostengünstig und bei Bedarf kontinuierlich durch automatisiertes Abfragen des Messsystems überwacht werden kann.

I.1.2 Bedeutung der Zuverlässigkeit oberflächenapplizierter FBG-Dehnungssensoren

Trotz der enormen Vorteile von FBG-Dehnungssensoren gegenüber konventioneller Dehnungsmesstechnik fehlen der faseroptischen Messtechnik Qualifizierungsmethoden, die erst den zuverlässigen Einsatz dieser Sensorik bei der Strukturüberwachung von Bauteilen möglich machen.

Eine Anbindung des FBG-Sensors an ein Messobjekt kann, je nach Ausbildung des Sensorkörpers, durch Löten, Kleben oder Schweißen erfolgen. Die am häufigsten ausgeführte Verbindungstechnik ist jedoch das Kleben. In der praktischen Anwendung werden FBG-Sensoren oftmals mit den verschiedensten Klebstoffen auf unterschiedlichste Weise appliziert. Auf repro-

duzierbare Applizierungen als auch definierte Klebstoffgeometrien wurde in vielen Fällen wenig Wert gelegt. Eine Aussage über die Messunsicherheit und die Zuverlässigkeit der Messdaten in Kombination mit weiteren Einflussparametern, wie z. B. Luftfeuchte oder chemisch aggressive Medien, kann in vielen Fällen nicht getroffen werden. In der Literatur ([Li05], [Duc99], [Sir90], [Ans98]) sind bereits einige theoretische Modelle erarbeitet worden, in denen eine optimale Anbindung des FBG-Sensors an die Oberfläche eines Messobjekts bzw. integriert in das Messobjekt beschrieben ist. Ein experimenteller Vergleich zwischen DMS und FBG-Sensoren ist in [Rot08] beschrieben. Hier wurde bei Raumtemperatur das Verhalten von FBG Sensoren im Vergleich zu DMS bei Zug- und Biegebelastung untersucht. Dabei wurde der Dehnungsübertragungskoeffizient durch Referenzierung mit DMS bestimmt und eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erzielt. Appliziert wurden die Sensoren auf Zugproben aus verschiedenen Metallen. Diese Versuche wurden bei kleinen Dehnungen bis zu 1700 µm/m durchgeführt. Das Verhalten des Dehnungsübertragungskoeffizienten bei sehr hohen Dehnungen oder einem erweiterten Temperaturspektrum wurde nicht untersucht. In [Sch08] sind erste experimentelle Untersuchungen zur Ausbildung der Klebstoffgeometrie für die Applizierung von Fabry-Pérot-Sensoren auf Sensorträgern durchgeführt worden. Dabei wurden zusätzlich exemplarische Klebstoffe und deren Dehnungsübertragungsverhalten bei applizierten Sensoren gegenüber DMS untersucht. Einige Autoren [Tru01] haben Werkzeuge entwickelt, mit denen eine reproduzierbare Applizierung von Sensoren auf Messobjektoberflächen möglich ist. Diese Werkzeuge haben jedoch keine Produktreife erlangt, so dass es jedem Anwender selbst überlassen ist, auf welche Art dieser seine Sensoren appliziert. In der Praxis führt dies dazu, dass der Anwender annimmt, sein FBG-Dehnungssensor messe exakt die Dehnung seines Messobjekts, unabhängig von der Art der Applizierung. Die Zuverlässigkeit des Messsystems ist dabei nicht bekannt.

Das Fehlen von Standards und Handhabungsvorschriften für den Umgang mit dieser Messtechnik fordert daher die Berücksichtigung aller auf die Dehnungsübertragung Einfluss nehmenden Parameter und die Qualifizierung des FBG-Dehnungssensors unter den realen Messspezifikationen. Der Aufbau eines Prüfplatzes zur Qualifizierung von oberflächenapplizierten FBG-Dehnungssensoren eröffnet dieser Messtechnik den Zugang zu einem breiteren Anwendungsspektrum mit besonders sicherheitsrelevanten Feldern.

Unter Mitwirkung der Autorin ist als erster Schritt zur Standardisierung der FBG-Dehnungssensorik im Fachausschuss 2.17 des VDI eine Handhabungsrichtlinie erarbeitet und 2009 als Richtlinie VDI/VDE/GESA 2660 „Optischer Dehnungssensor basierend auf Faser-Bragg-Gitter“ veröffentlicht worden [VDI60].

I.1.3 Untersuchungsgegenstand und Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, Fragen der Dehnungsübertragung von oberflächenapplizierten FBG-Dehnungssensoren zu klären und eine experimentell gestützte Methode zu entwickeln, um die Dehnungsübertragung vom Messobjekt auf den Sensor zuverlässig zu beschreiben. Dabei werden ausschließlich Sensoranbindungen durch Klebung an die Messobjektoberfläche betrachtet.

Im Rahmen eines gemeinschaftlichen Forschungsprojekts mit der Firma EADS Innovation Works (IW) in Ottobrunn wurden verschiedene, neue Konzepte erarbeitet und die Grundlagen zu einer Optimierung der Sensoranbindung an das Messobjekt gelegt. Die so gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Entwicklung einer Validierungsmethodik und zum Aufbau eines Prüfplatzes für oberflächenapplizierte FBG-Dehnungssensoren eingesetzt.

I.1.4 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in sechs große Abschnitte. Abschnitt I beschäftigt sich mit den theoretischen und messtechnischen Grundlagen. In Abschnitt II wird die Charakterisierung der auf die Dehnungsübertragung maßgeblich Einfluss nehmenden Parameter, darunter Last, Temperatur und Feuchte, eingegangen. Auch die Bestimmung der mechanischen Parameter der Klebstoffe ist in diesem Abschnitt beschrieben. Abschnitt III beinhaltet die Beschreibung der angewendeten Messmethodik und der ausgewählten Referenzverfahren. Der in dieser Arbeit aufgebaute Messplatz wird dargestellt und die Grundlagen für eine Charakterisierung des Prüfverfahrens werden beschrieben. Der darauf folgende Abschnitt IV stellt die Entwicklung und Bewertung eines bauteilspezifischen FBG-Dehnungssensors in Form eines Patches dar. In Abschnitt V werden Empfehlungen zur Erlangung einer optimalen Dehnungsübertragung bei oberflächenapplizierten FBG-Dehnungssensoren ausgesprochen und in Abschnitt VI sind die erzielten Ergebnisse und prinzipiell erreichten Ziele zusammenfassend dargestellt. Abschließend sind ein Anhang und Verzeichnisse beigefügt.

I.2 Messtechnische Grundlagen

Dieses Kapitel erläutert Grundlagen der etablierten Dehnungsmessstreifentechnik, die als konventionelle Messtechnik immer wieder für Vergleichsmessungen mit FBG-Dehnungssensoren herangezogen oder als Referenzverfahren genutzt wird. Anschließend wird auf die allgemeine Funktionsweise von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren und deren Eigenschaften eingegangen. Das daran anschließend in diesem Kapitel vorgestellte Dehnungsübertragungsmodell bei geklebten Faser-Bragg-Gitter-Dehnungssensoren bildet die Grundlage zu den in Abschnitt II durchgeführten experimentellen Untersuchungen. Zum allgemeinen Verständnis wird abschließend auf in dieser Arbeit relevante Klebstoffe, deren Eigenschaften und die Mechanismen der Adhäsion eingegangen, welche bei der Sensoranbindung durch Klebung an die Messobjektoberfläche eine Rolle spielen.

I.2.1 Dehnungsmessstreifen

Dehnungsmessstreifen (DMS) haben sich in sehr vielen Anwendungsgebieten aufgrund langjähriger Erfahrung bewährt und etabliert. E. E. Simmons und A. C. Ruge entwickelten die ersten DMS (basierend auf der Widerstandsänderung von dünnem Kupferdraht) bereits um 1938 [Kei95] in den USA. Seitdem ist der Dehnungsmessstreifen kontinuierlich weiterentwickelt worden. Durch zahlreiche Untersuchungen, z. B. von C. Rohrbach und N. Czaika [Roh61], [Roh59], sind die Charakteristika von DMS festgestellt und in Handhabungsvorschriften und Richtlinien, z. B. VDI/VDE/GESA 2635 [VDI35] oder ASTM E 251-92 [AST25], fixiert worden.

Der Dehnungsmessstreifen besteht aus dünnen, metallischen Drähten, die auf einer oder zwischen zwei Folien aus isolierendem Material, dem sogenannten Träger, befestigt sind. Wird der DMS auf ein Bauteil aufgeklebt, das eine Dehnungsänderung $\frac{\Delta l}{l}$ erfährt, so entsteht im DMS proportional zur Dehnungsänderung eine Änderung des elektrischen Widerstands $\frac{\Delta R}{R}$ [Roh89], so dass gilt:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} \tag{1}$$

k bezeichnet den sogenannten „k-Faktor“. Prinzipiell wird der k-Faktor, also die Empfindlichkeit des DMS, durch die Volumenänderung des Messdrahts und durch die Änderung des spezifischen Widerstands bestimmt (vgl. hierzu [Kei95], S.36-43). Die Herstellungstechnologie des DMS beeinflusst, z. B. durch Wärmebehandlung oder der Kombination des Messgitters mit dem Trägermaterial, zusätzlich den k-Faktor. Aber auch die Klebstoffschichtdicke und die Elastizität des Klebstoffs haben Einfluss [Ste72]. In der Regel wird der k-Faktor eines DMS mittels einer Belastungseinrichtung innerhalb eines Dehnungsbereichs von ± 1000 µm/m unter defi-

nierten Laborbedingungen bestimmt. Gleichzeitig wird die Widerstandsänderung des DMS gemessen (vgl. [VDI35]).

I.2.1.1 Dehnungsübertragungsmodell DMS

Um eine zuverlässige Funktion des DMS zu gewährleisten, muss eine optimale Dehnungsübertragung durch definierte Anbindung des DMS an das Messobjekt erzielt werden. C. Rohrbach und N. Czaika [Roh59] haben dazu ein vereinfachtes Messstreifen-Modell entwickelt. Dieses Modell dient als Hintergrund für das in Kapitel 2.3 dieses Abschnitts beschriebene Dehnungsübertragungsmodell bei Faser-Bragg-Gitter-Dehnungssensoren.

Eine vereinfachte Form des Modells ist in Abb. 1 dargestellt. Es wird angenommen, dass der Klebstoff und das Trägermaterial des DMS ähnliche mechanische Eigenschaften aufweisen und daher zusammen als homogenes Trägermaterial angesehen werden können. Wird das Bauteil um ε_B gedehnt, so steigt die Dehnung ε_T im Trägermaterial über die Länge $\ddot{U}_{BT}$ an, bis $\varepsilon_B = \varepsilon_T$ erreicht ist. Die Dehnung ε_T steigt dann innerhalb der Übergangslänge $\ddot{U}_{TM}$ im Trägermaterial weiter an, da das im Vergleich zum weichen Trägermaterial sehr steife Messgitter die Dehnung übernehmen muss.

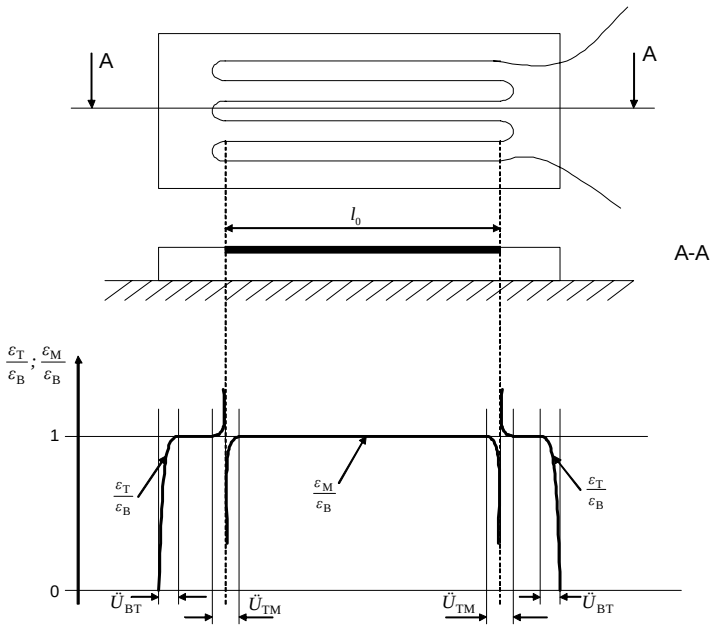


Abb. 1: Dehnungsübertragungsmodell nach Rohrbach und Czaika [Roh59]. Im oberen Teil der Abbildung ist ein aufgeklebter DMS mit seiner aktiven Gitterlänge im Schnitt A-A dargestellt. Darunter sind schematisch die Verhältnisse der Dehnungen zwischen Bauteil und Trägermaterial, $\varepsilon_T / \varepsilon_B$, und Bauteil und Messgitter, $\varepsilon_M / \varepsilon_B$, mit den entsprechenden Übergangslängen $\ddot{U}_{BT}$ und $\ddot{U}_{TM}$ dargestellt.

Infolge der Krafteinleitung durch die Dehnung des Bauteils in den DMS besitzt das Messgitter bereits eine endliche Dehnung ε_M, die wie die Dehnung des Trägermaterials so lange ansteigt, bis diese den Wert von ε_B erreicht. Wird ein anderes Trägermaterial mit anderem E-Modul bei gleichen geometrischen Verhältnissen eingesetzt, so wird die Übergangslänge $\ddot{U}_{TM}$ größer bzw. kleiner. Dies liegt darin begründet, dass z. B. ein weicheres Trägermaterial in geringerem Maße die Dehnung auf das Messgitter übertragen kann. Dadurch ändert sich auch in geringem Maße der k-Faktor des DMS [Roh59], da sich die Dehnung $\varepsilon_M = \varepsilon_B$ über eine kleinere Länge des Gitters ausbildet. In Abb. 1 ist auch zu erkennen, dass die Gitterlänge des Messgitters einen deutlichen Einfluss auf den k-Faktor hat. Wird die Gitterlänge immer kleiner, so kann es sogar dazu führen, dass selbst in der Mitte des Messgitters $\varepsilon_M = \varepsilon_B$ nicht mehr erreicht wird (vgl. [Kei95], S. 60, [Roh89] S. 496, [Sto00] S. 63-64) und der k-Faktor absinkt. Rohrbach und Czaika erweiterten dieses einfache Modell und konnten schließlich auch Aussagen über das Kriechen und die Hysterese von DMS machen. Das von ihnen entwickelte Modell wurde durch Experimente bestätigt [Roh89].

Um die Messunsicherheiten bei DMS möglichst klein zu halten, sind in der Literatur aus dem langjährigen Umgang mit dieser Messtechnik viele Maßnahmen zur Kompensation oder Korrektur von Fehlern beschrieben [Hof87], [Roh89], [Kei95]. Die Messunsicherheit der DMS liegt für die Dehnungsmessung im Prozentbereich. Dies ist abhängig von den aufgetretenen Messfehlern, die von elektrischen Unsymmetrien in der Brückenschaltung über mechanische Unsymmetrien im Messobjekt (z. B. durch Fertigungstoleranzen) bis hin zu Richtungsfehlern des DMS und Fehlern des Anwenders reichen können. Eine genaue Fehlerbetrachtung kann daher jeweils nur für die einzelne Messung und die jeweiligen Messbedingungen durchgeführt werden.

Beim DMS wird die mittlere Dehnung über die Länge des Messgitters bestimmt, die natürlich unterhalb der maximalen Dehnungsspitze liegt, die der Anwender gegebenenfalls ermitteln möchte. Für diese Art von Fehler bei der Ermittlung von Dehnungsspitzen gibt es keine Korrekturfaktoren. Der Anwender kann nur sehr kleine Messgitter auswählen und muss die erhöhte Messunsicherheit nach [Per84] mit in die Messwertanalyse einbeziehen.

Verstärkungseffekte von DMS auf sehr dünnen Materialien oder Materialien mit sehr geringem E-Modul (z. B. Gummi) werden oft vernachlässigt, können aber auch zu signifikanten Messfehlern führen [Ste72]. Je nach Aufbau des DMS kann sein E-Modul zwischen 7 GPa und 20 GPa [Per84] liegen. Da Verstärkungseffekte von DMS sehr stark von den jeweiligen Messobjekten des Anwenders (Geometrie, Werkstoff) abhängen, gibt es keinen generellen Korrekturfaktor für den Messwert. Beim Einsatz von dünnen Faserverbundwerkstoffen oder anisotropen Materialien müssen die Verstärkungseffekte von DMS-Rosetten für jede Orientierungsrich-

tung ermittelt werden. Der Messfehler kann dabei in jeder Orientierungsrichtung unterschiedlich sein.

Die Messunsicherheiten bei DMS hängen stark von den Applizierungs- und Einsatzbedingungen ab und vervielfachen sich, je mehr diese Bedingungen in ihrer Komplexität von den Kalibrierbedingungen des Herstellers abweichen.

I.2.1.2 Grenzen von DMS und DMS-Messtechnik

Ursprünglich sind DMS für die Dehnungsmessung auf metallischen Werkstoffen oder Beton entwickelt und angepasst worden. Durch die heutige Entwicklung vieler neuer Werkstoffe (vor allem im Bereich Faserverbundwerkstoffe und Kunststoffe) mit von Metall und Beton stark abweichenden mechanischen Eigenschaften und anderen Einsatzbedingungen gelangt der Einsatz von DMS an seine Grenzen. Durch die Entwicklung dieser neuen, oft „intelligenten“, Materialien und dem immer häufigeren Einsatz von Faserverbundwerkstoffen nimmt auch die Notwendigkeit stark zu, große bis sehr große Dehnungen zu erfassen (im Bereich von 10 mm/m bis 100 mm/m). Wie schon zuvor erwähnt, wird der k-Faktor von DMS in einem Dehnungsbereich von ± 1000 µm/m ermittelt. Dies liegt darin begründet, dass der DMS-Hersteller die Kalibrierung des DMS auf einem Testkörper vornimmt, bei dem sichergestellt sein muss, dass dieser im rein linear-elastischen Bereich belastet wird, um eine hohe Wiederholgenauigkeit zu erzielen. Sehr hohe, elastische Dehnungen eines Messobjekts, die den DMS bereits plastisch verformen, führen zu nicht mehr verwertbaren Messergebnissen, wenn das Verhalten des k-Faktors bei plastischer Verformung des DMS nicht berücksichtigt wird.

Ein Beispiel für problematische Messungen mit DMS ist die Applizierung von DMS während der Konstruktion einer Brücke mit einer Verstärkung aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK). Beim Verspannen der Brücke kommt es dann aufgrund der sehr hohen Dehnungen, die aufgebracht werden, zum Abplatzen der DMS. Ein anderes Beispiel ist die lokal in ein Messobjekt induzierte Wärme durch den Stromfluss am DMS, die bei speziellen Kunststoffen bereits zu einer lokalen Modifikation der mechanischen Eigenschaften führen kann.

Eine vergleichbare Anwendung von DMS auf heutzutage neu entwickelte Materialien kann deshalb ohne Berücksichtigung und Kenntnis dieser neuen Materialeigenschaften und der Eigenschaften und des Verhaltens der DMS zu stark fehlerbehafteten Messergebnissen führen. Oft ist die Anwendung von DMS aufgrund der Messbedingungen bei diesen speziellen Materialien daher auch nicht möglich. Dagegen bieten faseroptische Dehnungssensoren mit ihren Eigenschaften gerade bei der Bestimmung des Strukturverhaltens von neuen Materialien nicht nur eine Alternative zu DMS, sondern können unter Messbedingungen arbeiten, für die DMS nicht ausgelegt sind.

Die flächenhafte Ausbildung eines DMS begrenzt die Dehnungsmessung an sehr kleinen Messstellen. Dort können dagegen faseroptische Dehnungssensoren aufgrund ihrer kurzen physikalischen Länge bei sehr kleinem Durchmesser der optischen Faser zur punktgenauen Dehnungsbestimmung eingesetzt werden. Elektromagnetische Störfelder (Blitzeinschlag) stellen gerade für die Messsysteme und Sensoren in der Luftfahrt ein zusätzliches Problem dar. Im Gegensatz zu DMS bleiben faseroptische Sensoren von Blitzeinschlägen unbeeinflusst.

Neben DMS, die an ausgewählten Messstellen an einem Messobjekt die Dehnung erfassen, haben sich mittlerweile auch rein optische Dehnungsmessverfahren etabliert, die die Verformung des Messobjekts ganzheitlich erfassen (z. B. 3D-Stereokorrelationsverfahren, Photogrammetrie, Moiré-Verfahren, etc.). Vor allem bei der Beurteilung des Messobjekts im Ganzen unter Eintragung großer Dehnungen in Faserverbundwerkstoffe, die deutlich über den bei metallischen Werkstoffen üblichen Dehnungen liegen, sind die rein optischen Verfahren den DMS überlegen.

Die DMS-Messtechnik dagegen bietet aufgrund ihrer sehr ausgereiften Entwicklung Messmöglichkeiten in sehr hohen Frequenzbereichen mit sehr guter Auflösung. Abtastraten von mehreren Mega-Samples pro Sekunde und Kanal machen auch Hochgeschwindigkeitsmessungen möglich. Hohe Speicherkapazitäten und schnelle Datenspeicherungsraten machen bei modernen Messgeräten auch umfangreiche Messungen mit sehr vielen aufzuzeichnenden Messdaten möglich. Meist haben die Messgeräte bereits alle Möglichkeiten von der Messstellenkonfiguration über die Aufzeichnung der Daten bis zum fertigen Messergebnis implementiert, so dass der Anwender nur die Messstelle an das Gerät anschließen muss.

I.2.2 Funktionsweise von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren

I.2.2.1 Aufbau und Eigenschaften von Lichtwellenleitern

Lichtwellenleiter, die hier als Basiselement zum Einsatz kommen, bestehen aus einem Kern, der von einem Fasermantel (Cladding) umschlossen ist und zusätzlich noch von einer äußeren Beschichtung (Coating), wie in Abb. 2 dargestellt, geschützt wird.

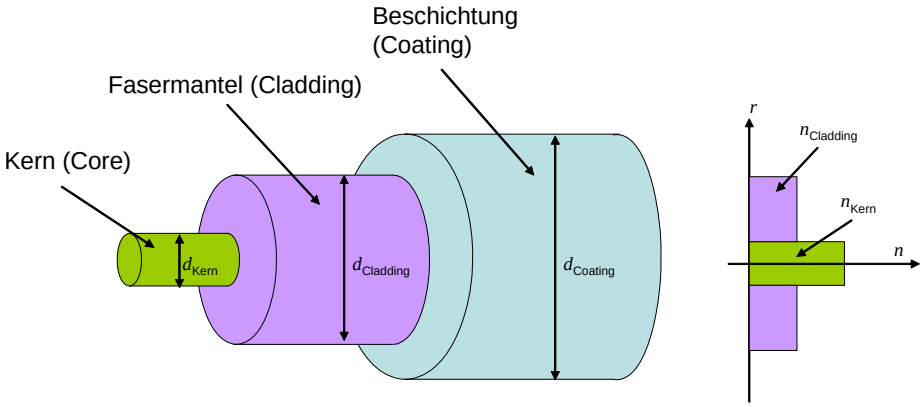


Abb. 2: Schematischer Aufbau eines Lichtwellenleiters (Single-Mode-Glasfaser). Rechts ist der Brechungsindexverlauf bezogen auf den Radius r der Faser dargestellt.

Bei Single-Mode-Glasfasern sind typische Kennwerte für die Durchmesser von Kern, Cladding und Coating: d_{Kern} = 4 µm bis 10 µm, $d_{Cladding}$ = 125 µm, $d_{Coating}$ = 150 µm bis 250 µm. Der Faserkern hat, wie in Abb. 2 rechts gezeigt, einen höheren Brechungsindex (n_{Kern} = 1,46 bis 1,48) als der Fasermantel ($n_{Cladding}$ = 1,44 bis 1,45), so dass sich in den Faserkern eingekoppeltes Licht durch Totalreflexion an der Grenzfläche von Kern und Cladding im Faserkern ausbreitet. Faserkern und Cladding bestehen aus synthetischem, verschieden dotiertem Quarzglas, während das Coating je nach Anwendung des Lichtwellenleiters aus verschiedenen Materialien bestehen kann. Dies ist vor allem bei der Anwendung des Lichtwellenleiters als Sensor relevant (vgl. Kapitel I.2.2.4 Coating in der Funktion des Dehnungsübertragers).

Lichtwellenleiter können als Gradientenindexfasern oder Stufenindexfasern ausgebildet sein. Bei Gradientenindexfasern fällt die Brechzahl des Kerns allmählich ab, bis sie die des Claddings erreicht. Bei Stufenindexfasern liegt an der Grenze zwischen Kern und Cladding ein Sprung in der Brechzahl vor, wie dies auch in Abb. 2 dargestellt ist. Des Weiteren unterscheidet man zwischen Single-Mode- und Multi-Mode-Fasern, also Lichtwellenleitern, in denen sich ausschließlich die Grundmode des Lichts oder eine Vielzahl von Moden ausbreiten kann. Als Mode bezeichnet man die Lichtwelle, die sich unter einem bestimmten Eintrittswinkel in einer optischen Faser ausbreiten kann. FBG-Sensoren werden in der Regel in Single-Mode-Stufenindexfasern eingeschrieben, in der nur die Grundmode mit ihren beiden Polarisationsrichtungen ausbreitungsfähig ist.

I.2.2.2 Prinzip Faser-Bragg-Gitter

Ein Faser-Bragg-Gitter (FBG) ist ein in einen Lichtwellenleiter eingeschriebener optischer Interferenzfilter, der durch eine periodische Modulation des Brechungsindexes der Faserkernbrechzahl entsteht.

Zwei Methoden zur Herstellung von Standard-FBG haben sich in der Praxis durchgesetzt: Herstellung mittels Interferometrie und Herstellung mittels Phasenmaske. Vor der FBG-Herstellung muss zunächst durch Wasserstoffdiffusion die Photosensitivität des Lichtwellenleiters gesteigert werden. Beim Herstellungsprozess mittels Interferenz wird der Lichtwellenleiter mit seinem photosensitiven Kern seitlich von UV-Licht, wie in Abb. 3 gezeigt, bestrahlt. Dabei entsteht im Kern durch die UV-Strahlung ein Interferenzmuster, das dort eine nicht reversible, permanente periodische Modulation des Brechungsindexes hervorruft.

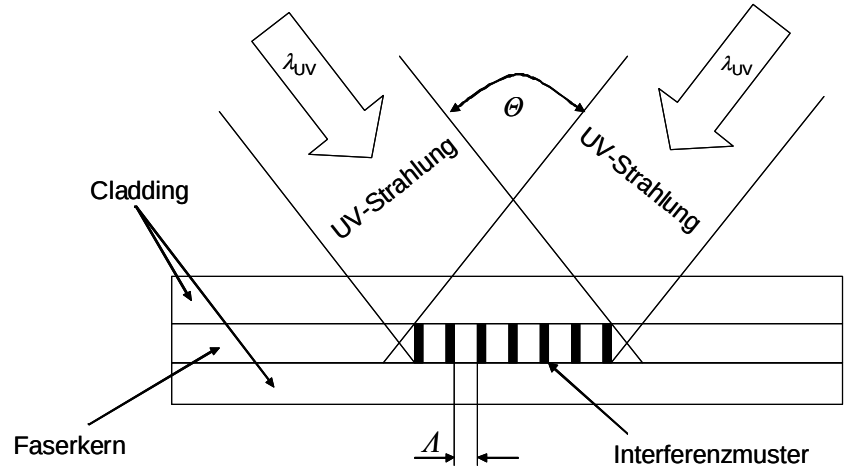


Abb. 3: Schematische Darstellung der Einschreibung eines Faser-Bragg-Gitters durch Interferenz nach [Zeh04].

Die Parameter des FBG werden durch den Herstellungsprozess bestimmt. Für die Periode Λ der Brechzahlmodulation des FBG ergibt sich $\Lambda = \lambda_{UV} / 2 \cdot \sin(\Theta/2)$.

Wird ein Lichtspektrum in einen Lichtwellenleiter mit FBG eingekoppelt, so entsteht durch die Änderung des Brechungsindexes am FBG Interferenz. Dabei wird ein Anteil des eingekoppelten Spektrums am Gitter reflektiert. Dieser Anteil entspricht der Lichtwellenlänge λ / n_{Kern} der doppelten Periode der Brechzahlmodulation 2Λ. Der reflektierte Anteil des Spektrums fehlt im transmittierten Spektrum. Schematisch ist das Funktionsprinzip des FBG in Abb. 4 dargestellt.

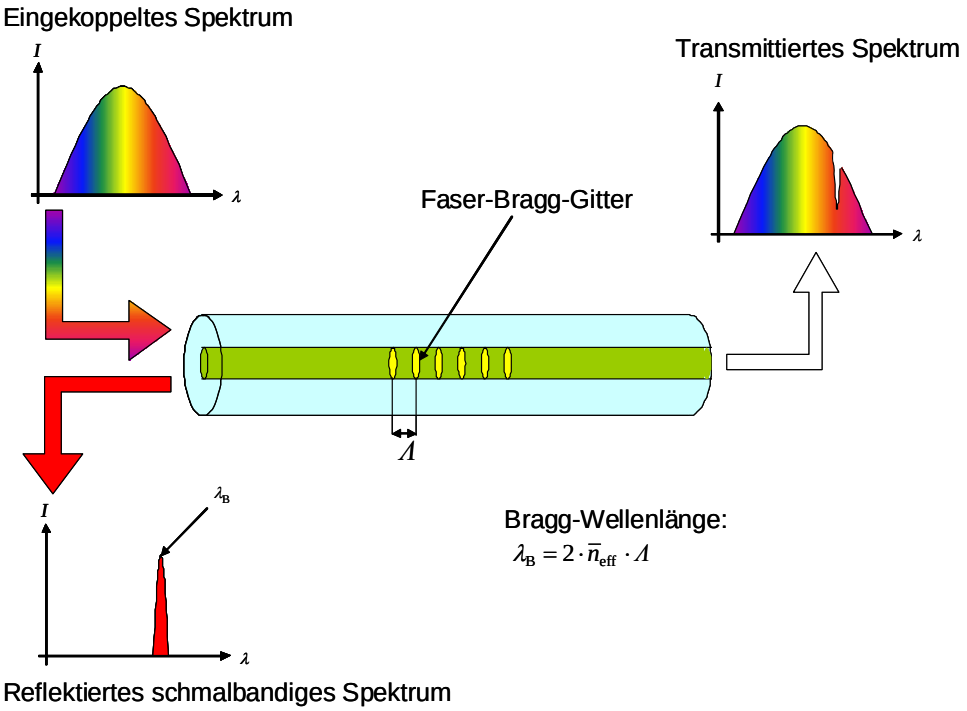


Abb. 4: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Faser-Bragg-Gitters.

Aus der konstruktiven Interferenz am Faser-Bragg-Gitter ergibt sich durch die Bragg-Bedingung für die Mittenwellenlänge λ_B der Filterbandbreite [Oth99]

$$\lambda_B(T,\varepsilon_i) = 2 \cdot \bar{n}_{eff}(T,\varepsilon_i) \cdot \Lambda(T,\varepsilon_i). \tag{2}$$

Die mittlere effektive Brechzahl des Grundmodus des Lichtwellenleiters wird als $\bar{n}_{eff}$ bezeichnet (siehe Anhang, Kapitel A.3). Die spektrale Breite des schmalbandigen Spektrums hängt von der physischen Länge des Faser-Bragg-Gitters und der Stärke der Brechzahländerung ab.

Aufgrund ihrer Temperatur- und Dehnungsempfindlichkeit in axialer Richtung eignen sich FBG zum Einsatz als Sensoren an Messobjekten. Die Änderung der Bragg-Wellenlänge bezogen auf eine mechanische Dehnung ε_i bzw. einer Temperaturänderung ΔT ist in (3) dargestellt [Oth99].

$$\mathrm{d}\lambda_B(T,\varepsilon_i) = \frac{\partial \lambda_B}{\partial T}\mathrm{d}T + \frac{\partial \lambda_B}{\partial \varepsilon_i}\mathrm{d}\varepsilon_i \tag{3}$$

$$\mathrm{d}\lambda_{\mathrm{B}}(T,\varepsilon_i) = \underbrace{2\left(\Lambda\frac{\partial\overline{n}_{\mathrm{eff}}}{\partial T}+\overline{n}_{\mathrm{eff}}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\right)\mathrm{d}T}_{\mathrm{a}} + \underbrace{2\left(\Lambda\frac{\partial\overline{n}_{\mathrm{eff}}}{\partial\varepsilon_i}+\overline{n}_{\mathrm{eff}}\frac{\partial\Lambda}{\partial\varepsilon_i}\right)\mathrm{d}\varepsilon_i}_{\mathrm{b}}\,. \tag{4}$$

In Teil a in Gl. (4) wird der Einfluss einer Temperaturänderung auf die Bragg-Wellenlänge beschrieben, Teil b stellt den Anteil der Wellenlängenänderung aufgrund einer eingetragenen Dehnung dar.

Einfluss der Temperatur

Eine Temperaturänderung ohne gleichzeitige mechanische Belastung der Faser $(\mathrm{d}\varepsilon_i = 0)$ führt zu einer Änderung in der Bragg-Wellenlänge:

$$\mathrm{d}\lambda_{\mathrm{B}}(\mathrm{T}) = 2\overline{\mathrm{n}}_{\mathrm{eff}}\Lambda\left(\frac{1}{\overline{\mathrm{n}}_{\mathrm{eff}}}\frac{\partial\overline{\mathrm{n}}_{\mathrm{eff}}}{\partial\mathrm{T}}+\frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial\mathrm{T}}\right)\mathrm{d}\mathrm{T} = \lambda_{\mathrm{B}}\cdot(\alpha_{\mathrm{n}}+\alpha)\mathrm{d}\mathrm{T} \tag{5}$$

α_{n} bezeichnet den thermooptischen Koeffizienten ($\alpha_{\mathrm{n}} = 8{,}6\cdot10^{-6}$ für Germanium dotierte Glasfasern) und α beschreibt den Wärmeausdehnungskoeffizienten von synthetischem Quarzglas $\left(\alpha = 0{,}55\cdot10^{-6}\right)$. Für die Änderung der Bragg-Wellenlänge bezogen auf eine Temperaturänderung kann man daher einen Temperaturkoeffizienten K_{T} einführen, so dass gilt:

$$\frac{\Delta\lambda_{\mathrm{B}}}{\lambda_{\mathrm{B0}}} = K_{\mathrm{T}}\cdot\Delta T \tag{6}$$

Die Bragg-Wellenlängenänderung wird dabei auf die Bezugs-Bragg-Wellenlänge λ_{B0} bezogen. Die Bezugs-Bragg-Wellenlänge wird in dieser Arbeit als die Bragg-Wellenlänge bezeichnet, die bei der Nullpunkt-Messung ermittelt wird. Der Temperaturkoeffizient verhält sich bei hohen Temperaturen nichtlinear und kann mit einem Polynom 2. Ordnung beschrieben werden, dessen Koeffizienten durch Kalibrierung bestimmt werden müssen [Flo04].

Einfluss einer homogenen, uniaxialen Dehnung

Wirkt bei konstanter Temperatur eine homogene, uniaxiale Dehnung ε_3 in Faserrichtung auf das FBG, so sind die Scherungskomponenten $\varepsilon_4,\varepsilon_5,\varepsilon_6$ im Dehnungstensor

$$\begin{Bmatrix}\varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz}\\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz}\\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz}\end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix}\varepsilon_{xx}\\ \varepsilon_{yy}\\ \varepsilon_{zz}\\ 2\cdot\varepsilon_{xz}\\ 2\cdot\varepsilon_{yz}\\ 2\cdot\varepsilon_{xy}\end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\end{Bmatrix} \tag{7}$$

gleich Null.

Der Zusammenhang zwischen den Transversalkomponenten ε_t des Tensors und ε_3 ist über die Querkontraktionszahl ν gegeben und ergibt sich zu $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_t = \nu \cdot \varepsilon_3$. Für die Änderung der Gitterperiode Λ in Abhängigkeit von ε_3 gilt:

$$\Lambda(\varepsilon_3) = \Lambda + \Lambda \cdot \varepsilon_3 \tag{8}$$

Die Änderung des mittleren effektiven Brechungsindex ist für die Polarisation in *x*- und *y*- Richtung (siehe dazu Abb. 5) gleich und über die Photoelastizität (Pockel-Koeffizienten, siehe Anhang, Kapitel A.4) mit der Dehnung folgendermaßen verknüpft [Ste97]:

$$\Delta n_x^{\text{eff}} = -\frac{n_{\text{eff}}^3}{2}\left[p_{12}\varepsilon_3 + (p_{11} + p_{12})\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{p_{11} - p_{12}}{2}\gamma_{\max} \right] \tag{9}$$

$$\Delta n_y^{\text{eff}} = -\frac{n_{\text{eff}}^3}{2}\left[p_{12}\varepsilon_3 + (p_{11} + p_{12})\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} - \frac{p_{11} - p_{12}}{2}\gamma_{\max} \right] \tag{10}$$

Dabei bezeichnen n_x^{eff} und n_y^{eff} den mittleren effektiven Brechungsindex in *x*- und *y*- Richtung, n_{eff} ist der effektive Brechungsindex im unbelasteten Zustand und p_{11} und p_{12} sind die Pockel-Koeffizienten der Faser. $\gamma_{\max}$ bezeichnet die maximale Schubdehnung senkrecht zur Faserachse. Gilt $\gamma_{\max} = 0$, so hängt eine Änderung des Brechungsindexes nicht mehr von der Polarisationsrichtung ab, und für den mittleren effektiven Brechungsindex gilt:

$$\Delta \bar{n}_{\text{eff}} = \Delta n_x^{\text{eff}} = \Delta n_y^{\text{eff}}. \tag{11}$$

Daraus ergibt sich mit Gl. (9) und (10) und aus $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \nu \cdot \varepsilon_3$:

$$\frac{\partial \bar{n}_{\text{eff}}}{\partial \varepsilon_3} = -\frac{\bar{n}_{\text{eff}}^{\,3}}{2}\left[p_{12} + (p_{11} + p_{12}) \cdot \nu \right]. \tag{12}$$

Es gilt:

$$\mathrm{d}\lambda_{\mathrm{B}} = 2\left(\Lambda \frac{\partial \bar{n}_{\text{eff}}}{\partial \varepsilon_3} + \bar{n}_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon_3} \right)\mathrm{d}\varepsilon_3 = 2\Lambda \frac{\partial \bar{n}_{\text{eff}}}{\partial \varepsilon_3}\mathrm{d}\varepsilon_3 + 2\bar{n}_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon_3}\mathrm{d}\varepsilon_3 \tag{13}$$

$$\mathrm{d}\lambda_{\mathrm{B}} = -2\Lambda \frac{\bar{n}_{\text{eff}}^{\,3}}{2}\left[p_{12} + (p_{11} + p_{12})\nu \right]\mathrm{d}\varepsilon_3 + 2\bar{n}_{\text{eff}} \Lambda \mathrm{d}\varepsilon_3 \tag{14}$$

Unter der Annahme, dass in Gl. (14) alle Parameter konstant bleiben, kann für die infinitesimal kleinen Parameter $\mathrm{d}\lambda_{\mathrm{B}}$ und $\mathrm{d}\varepsilon_3$ in erster Nährung die gemessenen Werte $\Delta\lambda_{\mathrm{B}}$ und $\Delta\varepsilon_3$ gesetzt werden.

$$\Delta\lambda_{\mathrm{B}} = \lambda_{\mathrm{B0}}\left(1 - \frac{\bar{n}_{\text{eff}}^{\,2}}{2}\left[p_{12} + (p_{11} + p_{12})\nu \right] \right)\Delta\varepsilon_3 \tag{15}$$

Der Parameter $\Delta\varepsilon_3$ wird in erster Nährung gleich ε_3 gesetzt, da die Bezugs-Dehnung bei λ_{B0} als Null definiert wird. Der Term $1-\left(\bar{n}_{\text{eff}}{}^2/2\right)\cdot\left[p_{12}+\left(p_{11}+p_{12}\right)\nu\right]$ wird zu p_e zusammengefasst und als photoelastische Konstante bezeichnet. Damit ergibt sich:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B0}}=\left(1-p_e\right)\cdot\varepsilon_3. \tag{16}$$

Für Single-Mode-Fasern vom Typ SMF 28 wird für $\left(1-p_e\right)$ häufig der Wert 0,78 angegeben. Das bedeutet, die Empfindlichkeit der Faser liegt bei einer Wellenlänge von 1550 nm bei 0,78 pm/(µm/m). Vereinfachend kann man einen Dehnungsübertragungskoeffizienten K_ε einführen, womit für die Bragg-Wellenlänge in Abhängigkeit von der Dehnung gilt:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B0}}=K_\varepsilon\cdot\varepsilon_3. \tag{17}$$

I.2.2.3 Spektral-optische Phänomene

Dämpfung

Eine Single-Mode-Faser, die geradlinig ausgelegt ist und keine Biegung erfährt, besitzt eine Dämpfungskonstante von ca. 0,5 dB/km bei einer Mittenwellenlänge von 1550 nm. Änderungen in der Dämpfung entstehen durch Krümmungen der Faser. Ab einem bestimmten Krümmungsradius der Faser wird das Licht nicht mehr durch Totalreflexion im Faserkern geführt, sondern strahlt in das Cladding ein. Experimentelle Untersuchungen [Jen07] haben gezeigt, dass dieser Biegeradius ca. 10 mm beträgt.

Polarisation

In einer isotropen, zylindrischen Single-Mode-Faser mit eingeschriebenen FBG, die keine äußeren Einwirkungen erfährt, propagiert genau eine Grundmode mit den zwei Polarisationsrichtungen p und q senkrecht zueinander durch die Faser. Idealerweise haben diese beiden Polarisationsrichtungen die gleiche Ausbreitungsgeschwindigkeit, die gleiche Ausbreitungskonstante und tauschen keine Energie miteinander aus. Der daraus resultierende Polarisationszustand ist damit konstant. Der Polarisationszustand einer optischen Faser kann aber durch intrinsische oder extrinsische Störungen verändert werden. Intrinsische Störungen, wie beispielsweise Verunreinigungen oder auf die Faser wirkende Dehnungsprofile, die den Faserkern verformen, entstehen während des Herstellungsprozesses der optischen Faser. Bei kurzen optischen Fasern, wie sie in der Sensorik Anwendung finden, können diese Effekte vernachlässigt werden. Extrinsische Störungen, beispielsweise durch Verdrillung oder Biegung der Faser, können bei

der Applizierung und Handhabung der Faser aufgebracht werden. Diese können zu Doppelbrechungseffekten führen und stellen in der Sensorik Störeffekte dar.

Doppelbrechung

Doppelbrechung ist eine polarisationsabhängige Dämpfung, die die Resonanzbedingungen für die beiden Polarisationsrichtungen in x- und y- Richtung trennt. Doppelbrechung im Spektrum eines FBG ist in den meisten Fällen ein unerwünschter Effekt. Bei FBG verursacht Doppelbrechung ein Verzweigen oder gar ein komplettes Aufsplitten der Mittenwellenlänge des Filterbandes.

Wird beispielsweise während der Applizierung durch eine Temperatur- oder Dehnungsänderung oder eine Biegung die optische Faser mechanisch deformiert, so wirkt sich dies auf die beiden Polarisationsrichtungen x und y in der Faser aus [Gaf00]. Durch die mechanische Verformung des Faserquerschnitts, sowohl über einen längeren Bereich als auch lokal, ist dieser nicht mehr kreisrund sondern elliptisch, wie in Abb. 5 dargestellt. Damit ändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit für die beiden Polarisationsrichtungen. Diese können sich dann in der Faser ein- und auskoppeln und Energie austauschen. Durch die beiden sich unterscheidenden Polarisationsrichtungen kommt es zu einer Änderung des effektiven Brechungsindexes des FBG (vgl. Gl. (9) und (10)).

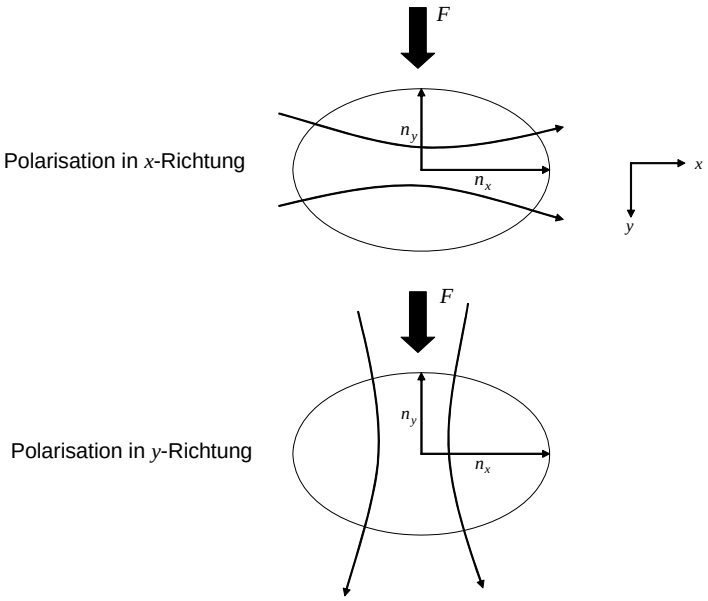


Abb. 5: Schematische Darstellung der Polarisationsänderung durch Deformation des Faserquerschnitts beim Lichtwellenleiter [Gaf00]. Die Feldlinien der elektrischen Feldstärke sind zur Anschauung übertrieben gekrümmt dargestellt.

Das Antwortsignal eines FBGs, das in axialer Richtung gedehnt wurde und eines unbelasteten FBGs ist in Abb. 6 dargestellt. Das Antwortsignal eines durch Querkraft deformierten FBGs ist in Abb. 7 dargestellt. Deutlich ist die Verzerrung durch die Querkraft im Spektrum zu erkennen.

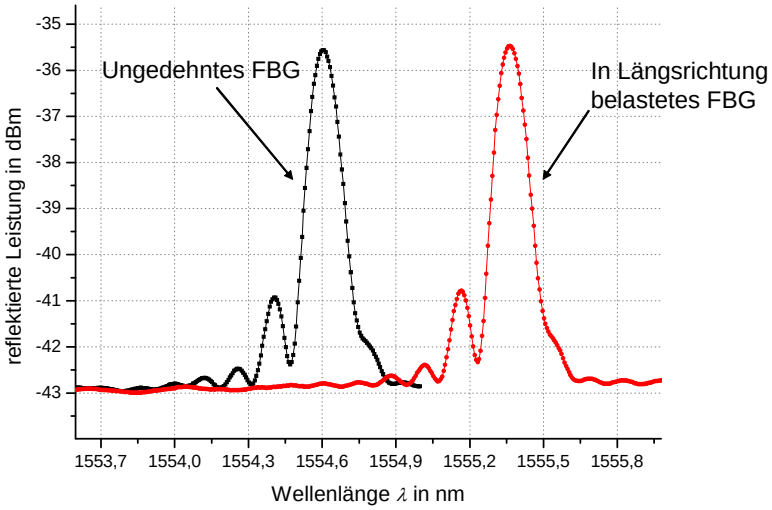


Abb. 6: Gemessenes Reflexionsspektrum eines entlang der Faser belasteten FBG-Sensors.

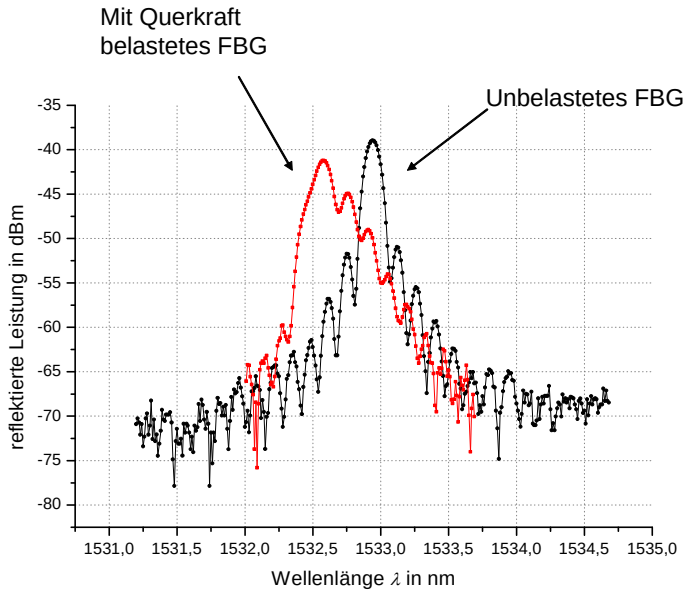


Abb. 7: Gemessenes Reflexionsspektrum eines durch Querkraft belasteten FBG-Sensors.

Die Auswirkung von Querkräften auf FBG ist in der Literatur bereits mehrfach beschrieben worden (vgl. dazu [Gaf00], [Zha04], [Oh04], [Abe06]). Man kann die Bragg-Wellenlänge in Abhängigkeit von den Polarisationsrichtungen x und y (mit Gl. (3), (6) und (14)) wie folgt darstellen [Oh04]

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_x \\ \Delta\lambda_y \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xT} & K_{x\varepsilon} \\ K_{yT} & K_{y\varepsilon} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix}, \tag{18}$$

K_{xT}, K_{yT} und $K_{x\varepsilon}$, $K_{y\varepsilon}$ sind die Temperatur- und Dehnungsempfindlichkeiten. Damit ergibt sich bei einer Querbeanspruchung eines FBGs der Zusammenhang zwischen der Bragg-Wellenlänge und einer Temperatur- oder Dehnungsänderung durch eine (2,2)-Matrix, dessen vier Koeffizienten bestimmt werden müssen.

I.2.2.4 Coating in der Funktion des Dehnungsübertragers

Das Coating bei Lichtwellenleitern dient in erster Linie dem mechanischen Schutz von Cladding und Faserkern. Prinzipiell haben sich drei Coatings als Standard durchgesetzt: Acrylat, Ormocer® und Polyimid. Nutzt man optische Fasern nicht nur als Übertragungsmedium für Licht, sondern auch als Sensoren, so kommt eine Vielzahl von Coatings, oft speziell angepasst für die unterschiedlichsten Anwendungen, zum Einsatz. Vor allem in der Anwendung von FBG Sensoren zur Detektion von chemischen Parametern, wie z. B. pH-Konzentration oder Feuchte, werden oft spezielle Polymere, die sensitiv auf die zu detektierenden Substanzen reagieren, eingesetzt [Ven08], [Cor07].

Coatings können auf zweierlei Weise auf optische Fasern aufgebracht werden. Zum einen wird die Stelle, an der das FBG eingeschrieben wird, entcoatet und nach dem Einschreibevorgang nachträglich wieder mit einem Coating versehen. Zum anderen wird das FBG während des Ziehvorgangs der Faser eingeschrieben (sog. Ziehturmgitter). Im Anschluss wird die Glasfaser entsprechend dem üblichen Prozess beim Ziehvorgang über die gesamte Länge mit einem Coating versehen. Dadurch entsteht eine im Vergleich zum nachträglichen Aufbringen des Coatings gleichmäßige und homogene Faserummantelung, die keine Übergänge oder unterschiedliche Schichtdicken besitzt. Typische Schichtdicken von Coatings liegen je nach deren Art im Bereich von 10 µm bis 125 µm, wie in Abb. 2, Kapitel I.2.2.1, dargestellt.

Die Dehnungsübertragung von einem Messobjekt auf einen FBG-Sensor durch das Coating muss möglichst verlustfrei erfolgen. Ansätze einer Modifikation des Coatings zur Optimierung der Dehnungsübertragung sind in [Hab03] zu finden. Dort wurde ein Plasmapolymer-Coating zur Verbesserung der Haftung zwischen dem faseroptischen Sensor und einer Zementsteinmatrix entwickelt. Für die Schadensanalyse ist beispielsweise der Einfluss des Coatings von integrierten FBG-Sensoren in Faserverbundwerkstoffen untersucht worden [Oka02].

Dabei wurde experimentell nachgewiesen, dass ein mit Polyimid gecoateter und ein ungecoateter FBG-Sensor Risse quer verlaufend zu den Verstärkungsfasern gut detektieren können. Zur Verbesserung der Temperaturempfindlichkeit von FBG-Sensoren bei kryogenen Temperaturen, und um FBG-Sensoren an Messobjekte zu verschweißen (im Gegensatz zum Kleben) oder in Metallen einzubetten, wurden auch metallische Coatings entwickelt und untersucht [Lup05], [Xie07]. Der Fokus der Untersuchungen lag jedoch auf der Temperaturempfindlichkeit der metallischen Coatings (z. B. Nickel-Kupfer oder Aluminium), die über die Schichtdicke des Coatings eingestellt werden kann. Das Dehnungsübertragungsverhalten von metallisierten FBG wurde dabei nicht untersucht. Gerade zur Optimierung der Dehnungsübertragung von metallischen Messobjekten auf ein FBG wird angenommen, dass ein metallisches Coating, welches in seinen mechanischen Eigenschaften dem des Messobjekts ähnlich sein muss, die Dehnung besser übertragen kann. Untersuchungen zu diesem Thema sollten in weiterführenden Forschungen durchgeführt werden. Da das Coating eine weitere Zwischenschicht zwischen dem Messobjekt, dem Klebstoff und dem sensitiven FBG darstellt, ist für eine Optimierung der Dehnungsübertragung wichtig, ein möglichst dünnes Coating aus einem an das Messobjekt angepassten Werkstoff zu verwenden.

Qualitative Aussagen zum Verhalten des Coatings

Die Haftung des Coatings auf dem Cladding schwankt je nach Coating-Typ stark. Zwischen Coating und Cladding kann es also bei Überschreiten einer bestimmten Scherkraft zu einem Lösen des Haftverbundes kommen. Dieser Prozess findet nicht kontinuierlich statt, sondern, wie in Abb. 8 dargestellt, stückweise und ruckartig. Dies kann über die plastische Deformation des Coatings hinaus bis zur Zerstörung des Coatings gehen.

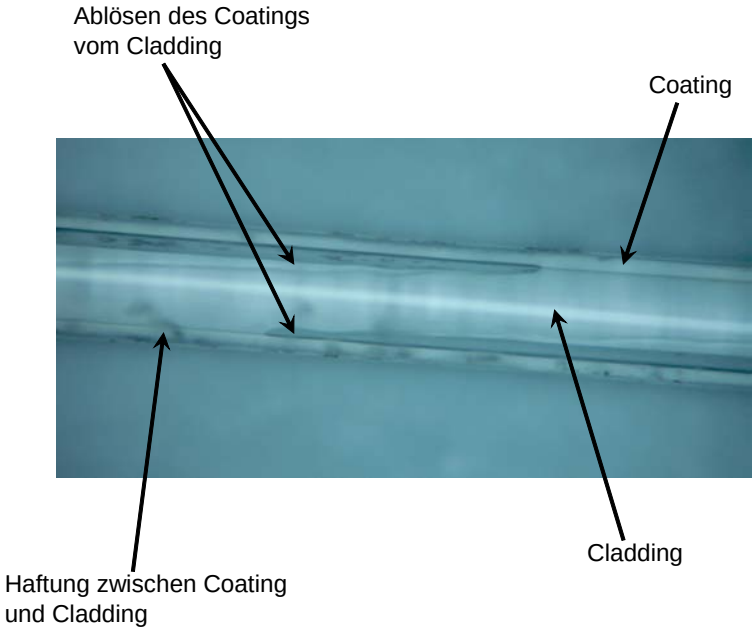


Abb. 8: Haftungsverlust zwischen Cladding und Coating.

Aus Abb. 8 wird auch deutlich, dass neben schon abgelösten Stücken des Coatings Teile des Coatings am Cladding haften können. Treten diese Ablösevorgänge bei applizierten optischen Fasern auf, die ein FBG als Sensor enthalten, so kann es bei der Dehnungsübertragung vom Messobjekt auf den Sensor zu Störungen kommen. Löst sich ein Teil des Coatings im Bereich des FBG-Sensors vom Cladding und existiert gleichzeitig ein weiterer Bereich, in dem der FBG-Sensor einen Haftverbund mit dem Coating eingeht, erfährt der FBG-Sensor eine Dehnung, die nicht mehr als Dehnung des Messobjekts interpretierbar ist. Um Effekte dieser Art zu vermeiden, wird eine spezielle Anpassung oder Entwicklung des Coatings, z. B. mit angepassten mechanischen Eigenschaften, zur Optimierung der Dehnungsübertragung angestrebt. Dies ist für eine optimale Anbindung des Sensors an das Messobjekt von wesentlicher Bedeutung.

I.2.2.5 FBG-Messtechnik und Signalauswertung

Die wellenlängenbasierte Messtechnik zur Aufnahme und Auswertung der Signale von FBG hat sich in den letzten Jahren enorm weiterentwickelt. Es gibt mehrere Verfahren, um die Bragg-Wellenlänge – das eigentliche Messsignal – zu erfassen und auszuwerten. Die am häufigsten genutzte Messtechnik basiert auf den Prinzipien des Wavelength Divison Multiplexing (WDM) und des Time Division Multiplexing (TDM). Beim WDM werden die unterschiedlichen Zentralwellenlängen der einzelnen Filterbandbreiten als wellenlängenkodiertes Signal genutzt, während beim TDM-Verfahren die unterschiedlichen Laufzeiten des Lichts aufgrund von verschiedenen Faserlängen zwischen FBG und Detektor genutzt werden. Beim TDM-Verfahren können also alle FBG-Sensoren in einer optischen Faser dieselbe Bragg-Wellenlänge besitzen, da über die Laufzeit des Lichts die Messstelle gefunden wird und gleichzeitig durch einen Wellenlängendekoder die Bragg-Wellenlängenänderung ermittelt werden kann. Das TDM-Verfahren benötigt zwischen den einzelnen Sensoren eine gewisse Länge an optischer Faser (z. B. 10 m), was dieses Verfahren besonders für Messungen an großen Bauwerken mit sehr weit entfernten Messstellen prädestiniert (Brücken, Deiche). Die Auflösung des WDM-Verfahrens dagegen liegt wesentlich höher als beim TDM-Verfahren und die Sensoren können in sehr kurzen Abständen (einige Zentimeter) hintereinander liegen.

Ein häufig genutztes Messgerät zur Erfassung und Auswertung von FBG-Signalen ist der Optische Spektrumanalysator (OSA). Der Messaufbau mit einem OSA ist schematisch in Abb. 9 gezeigt.

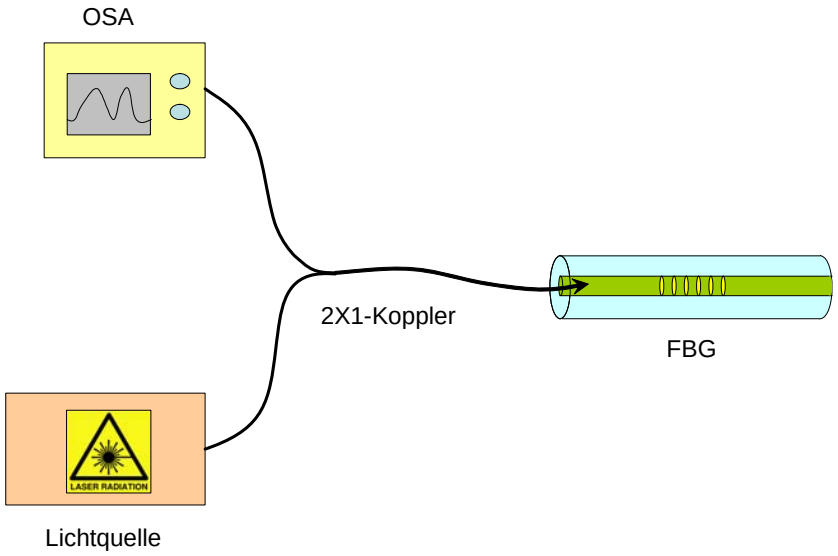


Abb. 9: Schematische Darstellung einer Messung mit einem OSA.

Eine Lichtquelle (z. B. LED oder Weißlichtquelle), das FBG und der OSA werden über einen 2X1-Koppler miteinander verbunden. Je nach Konfiguration kann mit dem OSA sowohl das Transmissions- als auch das Reflexionsspektrum des FBG analysiert werden. Der OSA detektiert das reflektierte optische Spektrum der angeschlossenen optischen Faser. Die Bestimmung der Bragg-Wellenlänge erfolgt in der Regel durch einen mathematischen Algorithmus.

Für den Einsatz als Feld- und Labormesstechnik, bei der der Fokus auf hohen Abtastraten, Robustheit und Kostengünstigkeit liegt, sind von verschiedenen Herstellern FBG-Messgeräte, sogenannte Interrogatoren, entwickelt worden. Im Gegensatz zu einem OSA, bei dem optische Koppler und eine externe Lichtquelle als zusätzliche Komponenten in den Messaufbau integriert werden müssen, sind bei Interrogatoren bereits die Lichtquelle, ein System zum Auslesen des FBG-Signals und z. T. Signalverarbeitungseinheiten im Gerät implementiert. Das Messprinzip der meisten auf dem Markt angebotenen Interrogatoren ist das WDM-Verfahren. Dabei ist, wie in Abb. 10 dargestellt, ein durchstimmbarer Laser im Gerät integriert, der kontinuierlich einen bestimmten Wellenlängenbereich, in dem die zu detektierenden Bragg-Wellenlängen liegen, durchfährt (z. B. 1510 nm bis 1590 nm). Das vom FBG reflektierte Signal wird dann mit einem Referenzsystem (picoWave®) analysiert und nach geeigneten Signalverarbeitungsschritten an einen PC übermittelt. Der Vorteil eines durchstimmbaren Lasers in solchen Geräten gegenüber beispielsweise einer Breitbandlichtquelle liegt in der höheren Leistung des Lasers und in der Möglichkeit, mehr Sensoren gleichzeitig (durch einen größeren Wellenlängenbereich) abzutasten. Diese kommerziell erhältlichen Interrogatoren erreichen derzeit

eine Abtastrate von 500 kHz. Dies macht den Einsatz von Interrogatoren für statische und quasistatische Messungen möglich.

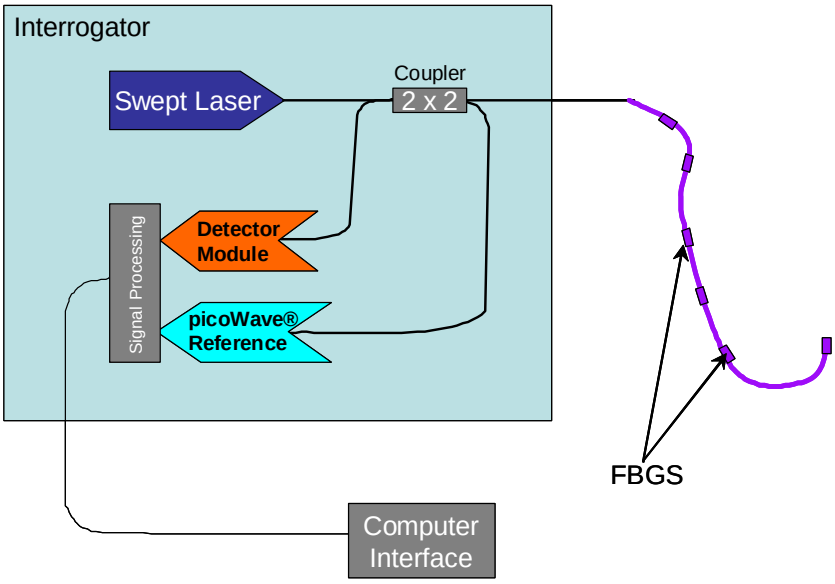


Abb. 10: Schematische Darstellung des Aufbaus eines FBG-Messgeräts (Quelle: Firma Micron Optics Inc.).

Für dynamische Messungen sind zwar bereits spezielle Messgeräte konzipiert worden, die eine Abtastung von FBG-Messsignalen im höheren kHz-Bereich ermöglichen, jedoch sind diese bisher noch nicht zur Produktreife gelangt. Der Trend bei der kommerziell erhältlichen Messtechnik geht dahin, die Robustheit zu optimieren und die Geräte kompakter zu gestalten, um diese für Feldeinsätze zu nutzen. Zudem wird die Labormesstechnik hinsichtlich höherer Auflösung und schnellerer Abtastung für höhere Frequenzen weiterentwickelt.

Die Software bei den in dieser Arbeit eingesetzten Interrogatoren (si425, si720, sm125 und sm130 von der Firma Micron Optics Inc.) ist ein offener LabView-Code, bei dem die vom Messgerät mit dem jeweiligen Messverfahren ermittelte Bragg-Wellenlänge ausgegeben wird. Werden FBG als Dehnungssensoren oder Temperatursensoren eingesetzt, so ist es dem Anwender dieser Messtechnik überlassen, wie er aus dem Messsignal des Messgeräts das Messergebnis bestimmt. Zu dessen Implementierung in der Software gehört beispielsweise die Ermittlung eines Dehnungsübertragungskoeffizienten für die gegebene Applizierung unter den gegebenen Messbedingungen. Mittlerweile gibt es auch kommerzielle Anbieter von Interrogatoren, die eine Softwareoberfläche entwickelt haben, mit der, ähnlich wie bei der DMS-Messtechnik, der Anwender bestimmte Parameter (z. B. Dehnungsübertragungsfaktor, Verstärkung etc.) in die Software eingeben kann und diese dann dem Anwender das fertige Mess-

ergebnis ausgibt, ohne dass er eine spezifizierte Kenntnis über die Funktion der Bragg-Gitter-Technik haben muss.

Muss der Anwender dieser Technik jedoch selbst das Messsignal soweit mathematisch auswerten, um das gewünschte Messergebnis zu erhalten, so muss dieser das mit dem Messgerät eingesetzte Messverfahren kennen. Im Allgemeinen haben sich für FBG-Messgeräte folgende Messverfahren durchgesetzt: Bestimmung des Antwortsignals eines FBG a) durch Ermittlung der Mittenwellenlänge (z. B. bei nicht-symmetrischen FBG-Antwortsignalen), b) durch Ermittlung der Schwerpunktswellenlänge (Centroid-Wellenlänge) und c) durch Ermittlung des Maximums des Antwortsignals durch Gauss-Fit [Hof08]. Die Bragg-Wellenlänge in ihrer eigentlichen Definition ($\lambda_B = 2\bar{n}_{eff}\Lambda$) wird von keinem Messgerät ermittelt, da diese nicht die Möglichkeit haben, direkt die Änderung des Brechungsindexes zu messen. Die Bezugs-Bragg-Wellenlänge λ_{B0} wird abhängig von der Messaufgabe als die Bragg-Wellenlänge beim Nullpunkt der Messung definiert. Als Grund-Bragg-Wellenlänge λ_{BG} wird des Weiteren in dieser Arbeit diejenige Bragg-Wellenlänge des Sensors definiert, die bei Normklima ohne mechanische Belastung vom Messgerät angezeigt wird. Die Kenntnis der Grund-Bragg-Wellenlänge ist für die Erstellung von Kalibrierkurven notwendig. Eine möglichst genaue Bestimmung der Bragg-Wellenlänge ist notwendig, da in ihr die wichtigen Informationen über eine Temperatur- und Dehnungsänderung enthalten sind. Der Anwender muss weiterhin beachten, dass das optische Messsystem durch seine Komponenten (z. B. Rauschanteile durch Analog-Digitalwandler oder Abtastfehler, Langzeitstabilität und Wiederholgenauigkeit) auch das zu ermittelnde Antwortsignal des FBG beeinflusst.

Sowohl in der Hardware- als auch in der Softwareentwicklung von FBG-Messsystemen zur kommerziellen Nutzung und weiteren Verbreitung dieser Technik liegt enormes Entwicklungspotential. Für den Anwender soll, ähnlich der DMS-Messtechnik, ein Messverfahren vorliegen, das anwendungsorientiert genutzt werden kann, ohne dass tiefere Kenntnisse komplizierter optischer Messprinzipien erforderlich sind. Es ist ebenso wichtig, dass sowohl Messtechnik als auch Sensorik aufeinander abgestimmt sind. Die Wellenlängen der eingesetzten FBG-Sensoren müssen im Messbereich des Messgeräts liegen. Es gibt hoch reflektierende und niedrig reflektierende FBG; entsprechende Einstellungen müssen im Gerät zur Detektion des Antwortsignals bei unterschiedlichen reflektierten Leistungen vorgenommen werden. Die Konfiguration der Sensoren, d. h. die Festlegung der jeweiligen Bragg-Wellenlängen, ist so zu wählen, dass kein Antwortsignal eines FBG sich mit dem Antwortsignal eines anderen FBG überlappt. Wichtig ist dies, wenn beispielsweise an einem Messkanal mehrere FBG angeschlossen sind, die auf einem Messobjekt teilweise auf Zug und auf Druck beansprucht wer-

den. Bei der Messobjektdeformation würden sich dann unter Umständen die reflektierten Wellenlängen überlagern, was eine Analyse des Messsignals nicht mehr möglich macht.

I.2.2.6 Dehnungssensoren basierend auf Faser-Bragg-Gitter

Wie bei DMS gibt es auch bei FBG als Dehnungssensoren eine große Vielzahl von Varianten. DMS werden nach bestimmten Kriterien, wie z. B. Ohmscher Widerstand, Größe, Art der Brückenschaltung, Rosette, Universalanwendung oder Spezialanwendung (z. B. hohe Temperaturen), offen oder gekapselt bzw. Anpassung an bestimmte Werkstoffe, in Serien und Familien unterteilt. Bei den FBG-Dehnungssensoren hat jedoch eine einheitliche Klassifizierung aufgrund der zu geringen kommerziellen Verbreitung noch nicht stattgefunden.

FBG-Dehnungssensoren können beispielsweise nach der Art ihrer Einschreibung und Anwendung in Familien unterteilt werden. Allgemein unterscheidet man jedoch zwischen den FBG, die eingeschrieben in eine optische Faser direkt auf ein Messobjekt appliziert werden, und den Sensor-Patches. Zu den FBG-Dehnungssensoren, die direkt auf einem Messobjekt appliziert werden, gehören neben den in Standard-Fasern eingeschriebenen FBG auch die in Spezialfasern eingeschriebenen. Dazu zählen die sogenannten small-diameter-Fasern mit einem wesentlich geringeren Cladding-Durchmesser (z. B. 40 µm). Diese eignen sich bei Anwendungen, bei denen selbst der Cladding-Durchmesser von 125 µm von Standardfasern zu groß ist [NTak07]. Des Weiteren können FBG-Sensoren in polarisationserhaltende Fasern eingeschrieben werden, so dass beispielsweise Effekte durch Querbelastung gemessen werden können [Fau77]. In den letzten Jahren sind auch FBG in PCF-Fasern (photonic crystal fiber) eingeschrieben worden [Rin08]. Diese Fasern haben ein mikrostrukturiertes Cladding und besitzen besondere Merkmale, die besonders gezielt für Spezialanwendungen in der Messtechnik (zur Detektion von biologischen oder chemischen Substanzen) eingesetzt werden können [Rin08].

Eine besondere Bauart von FBG-Dehnungssensoren sind die sogenannten Patches [DE51], [US76]. Dabei wird die optische Faser mit dem FBG auf bzw. in einem Sensorträger appliziert bzw. integriert, der besondere Eigenschaften aufweist, um ihn an spezielle Messaufgaben anzupassen. Es gibt eine Vielzahl von Sensorträgern und Sensorgehäusen, die durch eine mechanische Kopplung mit dem FBG als sensitives Element zu einem Dehnungssensor werden.

In der Richtlinie VDI/VDE/GESA 2660 „Optischer Dehnungssensor basierend auf Faser-Bragg-Gitter“ [VDI60] sind die Parameter und Kennwerte von FBG-Dehnungssensoren, die zur Beschreibung der Sensoren zwingend notwendig sind, dargestellt, um für diese Parameter eine

Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichsten Dehnungssensoren auf FBG-Basis zu schaffen.

I.2.3 Dehnungsübertragungsmodell FBG

Das in Kapitel 2.1.1 vorgestellte Dehnungsübertragungsmodell von DMS und die in [Li05], [Duc99], [Sir90], [Che05] und [Ans98] entwickelten Modelle dienen als theoretische Grundlage zur Beschreibung der Dehnungsübertragung bei oberflächenapplizierten FBG-Sensoren. An dieser Stelle wird das in [Che05] und [Ste05] entwickelte Modell zum detaillierten Verständnis ausführlich dargestellt und um den Einfluss des Klebstoffüberhangs erweitert, um eine mathematische Grundlage für die hier durchgeführten experimentellen Untersuchungen aufzuzeigen. Das vereinfachte Modell ist in Abb. 11 dargestellt.

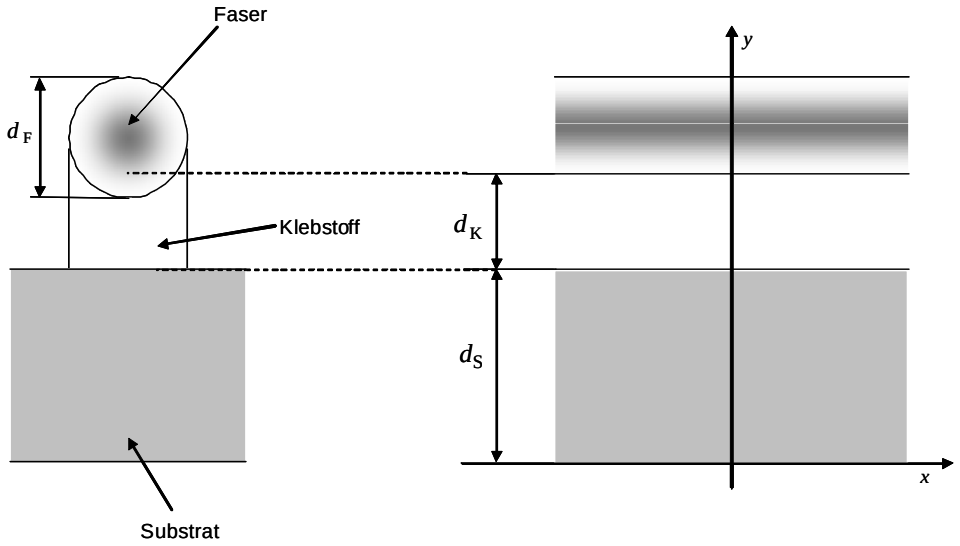


Abb. 11: Vereinfachte Darstellung einer applizierten optischen Faser auf einem Messobjekt (Substrat). Der Durchmesser der Faser ist mit d_F, die Klebstoffschichtdicke mit d_K und die Dicke des Substrats mit d_S bezeichnet.

Zunächst muss die effektive Klebstoffschichtdicke d_K bestimmt werden, denn diese ist über den Querschnitt der Faser nicht konstant. Bei diesem Modell (im Folgenden hier Modell A genannt, in Abgrenzung zum erweiterten Modell B) ergibt sich die effektive Klebstoffschichtdicke aus der Klebstoffhöhe h_K unter der Faser und dem Radius r_F der Faser nach Abb. 12 zu

$$d_K = h_K + r_F\left(1-\frac{\pi}{4}\right). \tag{19}$$

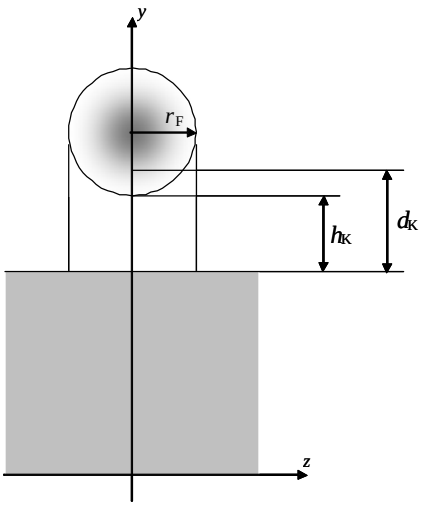


Abb. 12: Darstellung von Modell A zur Berechnung der effektiven Klebstoffschichtdicke.

Für Modell B, bei dem zusätzlich noch der Klebstoffüberhang a eingeführt wurde, ergibt sich die effektive Klebstoffschichtdicke d_K in Gl. (20) nach Abb. 13.

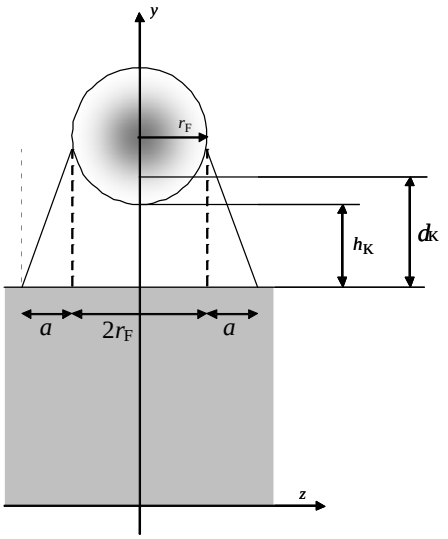


Abb. 13: Berechnung der effektiven Klebstoffschichtdicke nach Modell B mit Klebstoffüberhang a.

$$d_K = \left[2 r_F h_K + 2\left(r_F^2 - \frac{\pi}{4} r_F^2 \right) + a\left(h_K + r_F \right) \right] / \left(2 r_F + a \right). \qquad (20)$$

Der Zusammenhang zwischen den Verschiebungen der Faser u_F und des Substrats u_S bei Dehnung ist vereinfacht in Abb. 14 dargestellt:

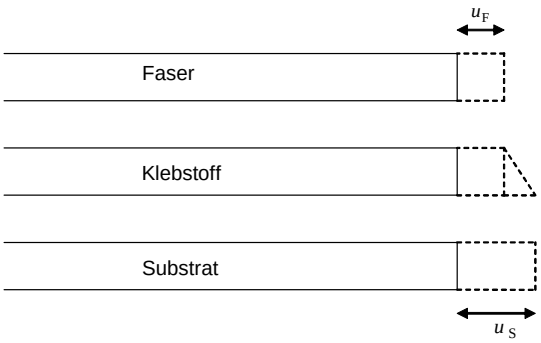


Abb. 14: Schematische, stark vereinfachte Darstellung der Verschiebungen zwischen Substrat, Klebstoff und Faser.

$$\varepsilon_S(x) = \frac{du_S}{dx}, \text{ mit } u_S = u_S(x), \tag{21}$$

$$\varepsilon_F(x) = \frac{du_F}{dx}, \text{ mit } u_F = u_F(x), \tag{22}$$

$$\gamma = \frac{u_S - u_F}{d_K}. \tag{23}$$

Greift am Substrat eine Kraft F_S an, die das Substrat homogen gleichmäßig dehnt, so ergibt sich aufgrund dieser Kraft am Substrat ein Kräftegleichgewicht, wie in Abb. 15 dargestellt.

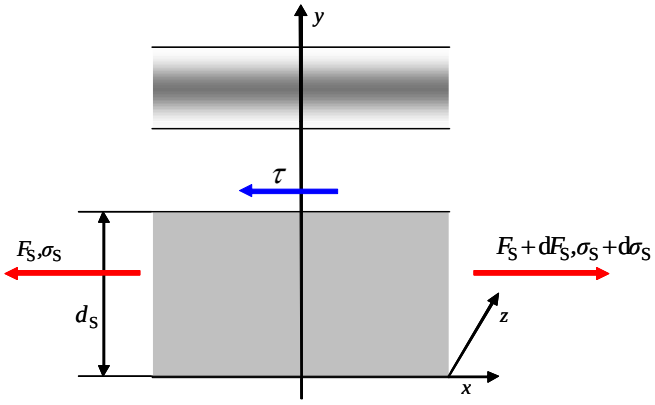


Abb. 15: Schematische Darstellung der Spannungen und Kräfte am Substrat.

Mit der angreifenden Kraft $F_S = \sigma_S \cdot A_S$ bezogen auf die Fläche des Substrats $A_S = d_S \cdot dz$ und der an der Grenzschicht zwischen Substrat und Klebstoff angreifenden Schubspannung $\tau = F/A$ mit $A = dx \cdot dz$ ergibt sich das Kräftegleichgewicht in x-Richtung zu [Che05]:

$$\frac{d\sigma_S}{dx} = \frac{\tau}{d_S}. \tag{24}$$

Das Kräftegleichgewicht bei Dehnung des Substrats muss auch an der Faser selbst bestimmt werden, wie in Abb. 16 dargestellt. Dabei wirkt eine Schubspannung $\tau = F / A$ auf die halb eingebettete Faseroberfläche $A = \pi \cdot r_F \cdot dx$. An der Faser greift die Kraft $F_F = \sigma_F \cdot A_F$ über die Faserfläche $A_F = \pi \cdot r_F^2$ an.

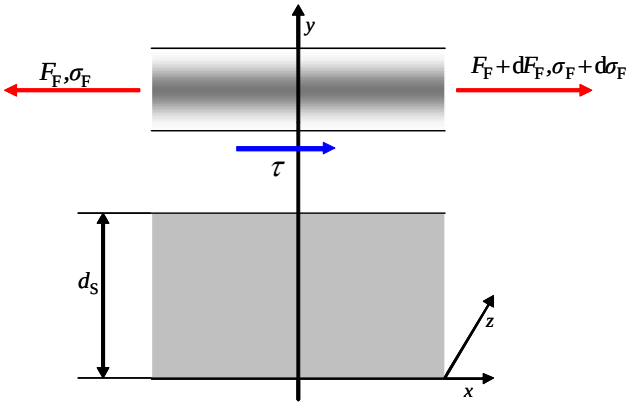


Abb. 16: Schematische Darstellung der Spannungen und Kräfte an der Faser.

Das Kräftegleichgewicht nach Abb. 16 ergibt sich in x-Richtung zu [Che05]:

$$\frac{d\sigma_F}{dx} = -\frac{\tau}{r_F}. \tag{25}$$

Um aus Gl. (24) und (25) die Dehnung des Substrats bzw. der Faser berechnen zu können, wird angenommen, dass der E-Modul des Substrats E_S, der E-Modul der Faser E_F und der Schubmodul des Klebstoffs G konstant sind. Es gilt des Weiteren:

$$\sigma_S(x) = E_S \cdot \varepsilon_S(x), \tag{26}$$

$$\sigma_F(x) = E_F \cdot \varepsilon_F(x), \tag{27}$$

$$\tau = G \cdot \gamma = G \cdot \frac{u_S - u_F}{d_K}. \tag{28}$$

Leitet man Gl. (26) nach x ab und setzt dies in Gl. (24) ein, so lässt sich mit Gl. (28) Gl. (29) für ε_S aufstellen:

$$E_S \cdot \varepsilon_S'(x) = G \cdot \frac{u_S - u_F}{d_K \cdot d_S}. \tag{29}$$

Nutzt man den Zusammenhang zwischen Dehnung und Verschiebung, wie in Gl. (21) und (22) definiert, so kann man Gl. (29) mit diesen Definitionen wie folgt schreiben:

$$E_S \cdot \varepsilon_S''(x) = \frac{G}{d_K \cdot d_S} \cdot (\varepsilon_S - \varepsilon_F). \tag{30}$$

Mit Gl. (30) ergibt sich ein Zusammenhang zwischen der Dehnung des Substrats und der Dehnung der Faser. Dieselbe Umformung kann nach Ableitung von Gl. (27) und eingesetzt in Gl. (25) mit folgendem Ergebnis durchgeführt werden:

$$E_F \cdot \varepsilon_F'(x) = -G \cdot \frac{u_S - u_F}{d_K \cdot r_F}. \tag{31}$$

Setzt man auch hier aus Gl. (21) und Gl. (22) den Zusammenhang zwischen der Dehnung und der Verschiebung ein, so ergibt sich eine Abhängigkeit zwischen der Dehnung der Faser und der aufgebrachten Dehnung im Substrat, wie in Gl. (25) dargestellt:

$$E_F \cdot \varepsilon_F''(x) = -\frac{G}{d_K \cdot r_F}(\varepsilon_S - \varepsilon_F). \tag{32}$$

Um nun den Dehnungsverlauf in der Faser zu berechnen, muss Gl. (32) in Gl. (33) umgeformt werden.

$$\varepsilon_F''(x) - \underbrace{\frac{G}{E_F \cdot d_K \cdot r_F}}_{k^2} \cdot \varepsilon_F = -\underbrace{\frac{G}{E_F \cdot d_K \cdot r_F}}_{k^2} \cdot \varepsilon_S. \tag{33}$$

Der Term $G/(E_F \cdot d_K \cdot r_F)$ wird zur weiteren Vereinfachung als Faktor k^2 bezeichnet. Damit ergibt sich Gl. (33) zu einer Differentialgleichung 2. Ordnung:

$$\varepsilon_F''(x) - k^2 \varepsilon_F(x) = -k^2 \varepsilon_S. \tag{34}$$

Die Lösung von Gl. (34) ergibt sich zu

$$\varepsilon_F(x) = C_1 e^{kx} + C_2 e^{-kx} + \varepsilon_S. \tag{35}$$

Die Konstanten in Gl. (35) können mit Hilfe der Randbedingungen bestimmt werden. Für die erste Randbedingung wird angenommen, dass die Dehnung in der Faser an der Stelle x = 0, also genau in der Mitte der Faser, den Dehnungen des Substrats entsprechen. Es gilt $\varepsilon_F(x=0) = \varepsilon_S(x=0)$. Für die zweite Randbedingung gilt: An den Enden der Faser, bei x = L, wird

die übertragene Dehnung mit 0 angenommen, da hier vom Substrat in die Faser noch keine Dehnungen eingetragen worden sind. Es gilt also $\varepsilon_F(x = L) = 0$.

Ersetzt man in Gl. (35) die e-Funktion durch ihre Definition von $\cosh(x)$ und $\sinh(x)$, mit

$$e^x = \cosh(x) + \sinh(x) \tag{36}$$

$$e^{-x} = \cosh(x) - \sinh(x) \tag{37}$$

so ergibt sich für Gl. (35):

$$\varepsilon_F(x) = C_1 \cdot [\cosh(kx) + \sinh(kx)] + C_2 \cdot [\cosh(kx) - \sinh(kx)] + \varepsilon_S . \tag{38}$$

Setzt man in Gl. (38) die erste Randbedingung ein, so ergibt sich

$$C_1 = -C_2 . \tag{39}$$

Setzt man hier nun auch noch die 2. Randbedingung ein, so ergibt sich C_2 *zu:*

$$0 = -C_2 \cdot [\cosh(kL) + \sinh(kL) - \cosh(kL) + \sinh(kL)] + \varepsilon_S , \tag{40}$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon_S}{2 \cdot \sinh(kL)} . \tag{41}$$

Die vollständige Lösung für Gl. (38) ergibt sich durch Einsetzen der beiden zuvor bestimmten Konstanten zu

$$\varepsilon_F(x) = \varepsilon_S \cdot \left[1 - \frac{\sinh(kx)}{\sinh(kL)}\right]. \tag{42}$$

Es wird deutlich, dass in dem Modell nach [Che05] und [Ste05] zwischen der Dehnung des Substrats und der Dehnung der Faser ein proportionaler Zusammenhang besteht. Dieser proportionale Zusammenhang wird durch mehrere Parameter beeinflusst: die Länge der Klebung L und durch k, das äquivalent zur Wurzel aus $G/(E_F \cdot d_K \cdot r_F)$ ist. Der Einfluss dreier dieser fünf Parameter wird im Anschluss in Kapitel I.2.3.1 noch durch Variation der Parametergröße verdeutlicht. Der Radius und der E-Modul der Faser werden dabei nicht variiert, da diese durch die Herstellung und Materialparameter der Fasern vorgegeben sind und nicht beeinflusst werden können. Der Einfluss des Klebstoffüberhangs aus Modell B wird direkt durch eine Änderung der Klebstoffschichtdicke (Gl. (20)) deutlich. Abschließend betrachtet kann aus der nun ermittelten Gl. (42), abgeleitet nach x und in Gl. (25) eingesetzt, die in Gl. (43) dargestellte Schubspannung an den Grenzen zum Klebstoff ermittelt werden:

$$E_F \cdot k\varepsilon_S \cdot \left[\frac{\cosh(kx)}{\sinh(kL)}\right] \cdot r_F = \tau . \tag{43}$$

I.2.3.1 Einfluss nehmende Parameter auf die Dehnungsübertragung nach dem Dehnungsübertragungsmodell

Durch Variation von Geometrie- und Material-Parameter über die Länge der Klebung lässt sich deren Einfluss auf die Dehnungsübertragung in den folgenden Diagrammen qualitativ darstellen. Zunächst wird der Einfluss der Klebelänge L auf die Dehnungsübertragung zwischen Substrat und Faser betrachtet. Dabei wurde die Klebelänge von der Mitte der Klebung bei x = 0 aus variiert, d. h. aufgrund der Symmetrie werden für $L/2$ verschiedene Werte angenommen. Für die anderen Einfluss nehmenden Parameter wurden folgende Werte angenommen:

$$d_K = 0{,}015\ \text{mm} = \text{const.},$$
$$E_F = 72.000\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$
$$r_F = 0{,}0625\ \text{mm},$$
$$\varepsilon_S = 0{,}1\ \frac{\text{mm}}{\text{m}}.$$

Aus Gl. (42) lässt sich somit die Dehnungsübertragungsrate als Verhältnis $\varepsilon_F / \varepsilon_S$ zwischen der Dehnung des Substrats und der Faser für unterschiedliche Verklebungslängen bestimmen (Abb. 17).

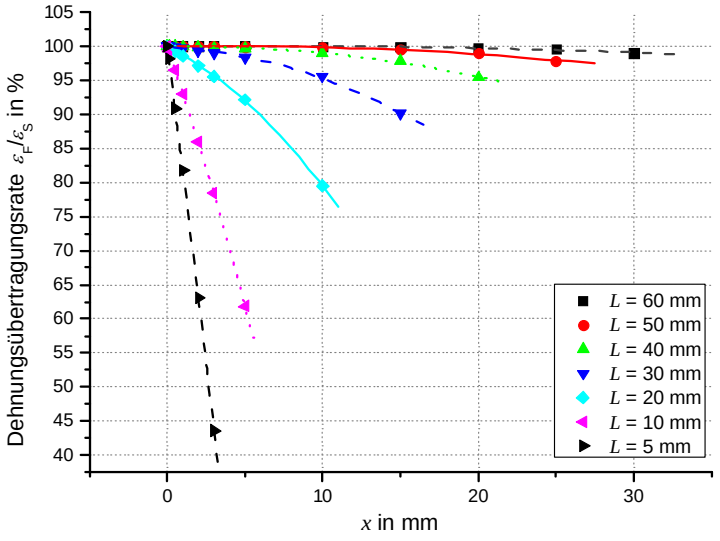


Abb. 17: Darstellung der berechneten Dehnungsübertragungsrate bei verschiedenen Verklebungslängen des FBG-Dehnungssensors.

Es ist aus Abb. 17 zu erkennen, dass bei FBG-Dehnungssensoren, die eine physische Länge von 10 mm haben, mindestens eine Verklebungslänge von 30 mm gewählt werden muss, um

im Bereich des FBG eine Dehnungsübertragungsrate von 99 % zu erreichen. Allgemein muss also die Verklebungslänge des FBG so gewählt werden, dass über die gesamte Länge des FBG eine homogene Eintragung der Dehnung stattfindet. Wählt man die Verklebungslänge zu kurz, so hat man bereits über der Länge des FBG-Sensors eine nicht-homogene Dehnungsverteilung, die die Dehnungsübertragung verändert und zu Verzerrungen im spektralen Antwortsignal des FBG-Sensors führen. Es ist auch zu beachten, dass bei erhöhten Temperaturen die Verklebungslänge größer gewählt werden muss, da sich die Bereiche der inhomogenen Dehnungseintragung deutlich vergrößern. Bei einer Verklebungslänge von $L = 60\,\mathrm{mm}$ und einer Änderung der Klebstoffschichtdicke h_K nach Berechnung Modell A ist in Abb. 18 der Einfluss auf die Dehnungsübertragungsrate bei ansonsten konstanten Parametern und Raumtemperatur dargestellt.

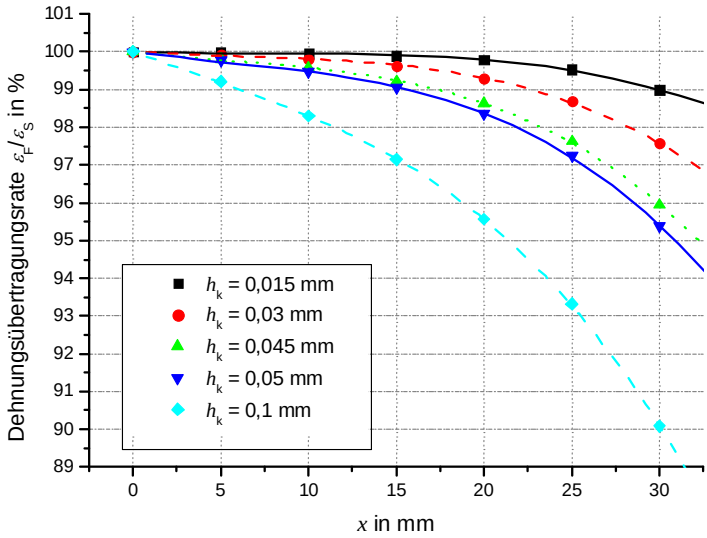


Abb. 18: Berechneter Einfluss der Klebstoffschichtdicke auf die Dehnungsübertragungsrate bei einer Verklebungslänge von L = 60 mm.

In Abb. 18 zeigt die Änderung der Klebstoffschichtdicke, dass bei steigender Klebstoffschichtdicke die Dehnungsübertragung über die Länge der Verklebung abnimmt. Dies kann man jedoch durch eine längere Verklebung ausgleichen. Bei einer Klebstoffschichtdicke von 50 µm erreicht man bei einer Verklebungslänge von 60 mm bereits noch 15 mm links und rechts von der Mitte der Verklebung eine Dehnung von 99 % (blaue Kurve). Erhöht man die Klebstoffschichtdicke auf 100 µm, so erreicht man 15 mm links und rechts von der Mitte der Verklebung nur noch eine Dehnung von 97 % (cyan-farbene Kurve). Der Einfluss der Klebstoffschichtdicke ist kleiner als der Einfluss der Verklebungslänge auf die Dehnungsübertragungsrate. Durch

eine sehr dünne Klebstoffschichtdicke in Kombination mit einer sehr langen Verklebung kann eine optimale Dehnungsübertragung erreicht werden. Variiert man nach Modell B den Klebstoffüberhang a, so kann man einen Einfluss auf die Dehnungsübertragungsrate in Abb. 19 erkennen.

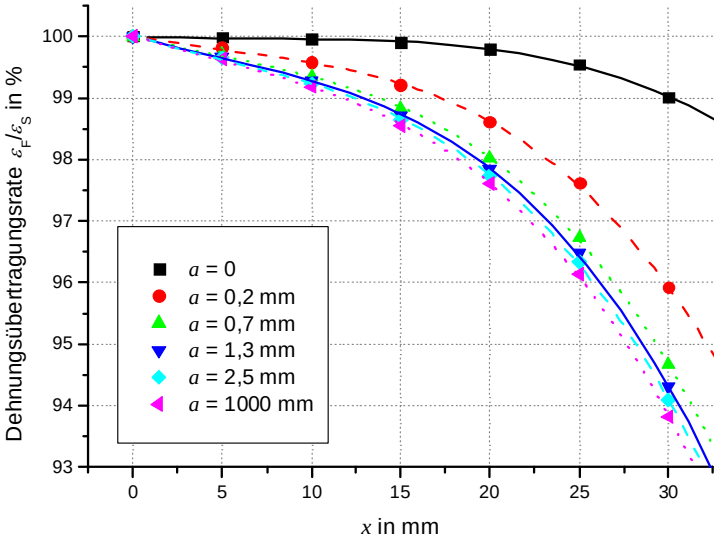


Abb. 19: Berechneter Einfluss des Klebstoffüberhangs auf die Dehnungsübertragungsrate bei Verklebung von L = 60 mm.

Nimmt man den Klebstoffüberhang a als unendlich groß an (z. B. 1000 mm), so entspricht dies einem halb eingebetteten FBG-Dehnungssensor. In diesem Fall liegt die auf den Sensor im Abstand von 15 mm links und rechts von der Mitte der Verklebung übertragene Dehnung bei 98,5 %. Im Vergleich dazu wird auf einen FBG-Dehnungssensor ohne effektive Klebstoffbreite (Modell A, siehe [Che05] und [Ste05]) an dieser Stelle eine Dehnung von 99,9 % übertragen. D. h., die Scherspannung, die auf den Klebstoff wirkt, ist in Modell A wesentlich kleiner als die Scherspannung in Modell B bei einem halbeingebetteten Sensor. Für eine günstige Dehnungsübertragung sind also die Verklebungslänge, die Klebstoffschichtdicke und der Klebstoffüberhang so zu wählen, dass diese in Kombination die Dehnung des Bauteils optimal an den Sensor transferieren. Ein weiterer Parameter, der bei diesem Dehnungsübertragungsmodell variiert werden kann, ist der Elastizitätsmodul, und damit der Schubmodul G, des Klebstoffs. Bei einer Änderung des E-Moduls des Klebstoffs zwischen 250 MPa und 20 GPa bei einer angenommenen Klebstoffschichtdicke von 15 µm ergab sich jedoch keine signifikante Änderung der Dehnungsübertragung über die Verklebungslänge.

Die untersuchten Einflussparameter auf die Dehnungsübertragung, also die Verklebungslänge L, die Klebstoffschichtdicke h_K, der Klebstoffüberhang a, und der Elastizitätsmodul E_K

des Klebstoffs wurden aus dem in Kapitel I.2.3 dargestellten Modell hergeleitet. Alle weiteren möglichen Einflussparameter auf die Dehnungsübertragung, wie z. B. die Temperatur, wurden durch experimentelle Untersuchungen charakterisiert und werden in Abschnitt II behandelt.

I.2.4 Klebstoffe und Adhäsion

I.2.4.1 Grundlagen der Adhäsion

Über eine eindeutige wissenschaftlich gültige Beschreibung der Haftung gibt es keine Einigung. Es gibt in der Literatur mehrere Ansätze, Adhäsion zu beschreiben; diese Ansätze stützen sich jedoch auf einzelne Beobachtungen. Prinzipiell lässt sich die Adhäsion als die intermolekulare oder interatomare Wechselwirkung zwischen zwei adhäsiven Partnern, bei dem ein belastbarer Verbund aufgebaut wird, beschreiben. In der Adhäsionstheorie unterscheidet man zwischen einem mechanischen und einem spezifischen Adhäsionsmodell [Bro05], [Wu82]. Adhäsion, die auf physikalischer oder chemischer Wechselwirkung basiert, wird als spezifische Adhäsion bezeichnet. Zur Beschreibung von Adhäsion gibt es mehrere gültige Theorien: die Polarisationstheorie, die Diffusionstheorie und die Theorie zur Beschreibung der chemischen Wechselwirkung bei der Adhäsion.

Die Polarisationstheorie beschreibt die intermolekulare Wechselwirkung von Dipolen. Diese physikalischen Bindungen, die z. B. bei der Haftung von organischen Polymeren auf blanken Metalloberflächen (Stoffe unterschiedlicher Elektronenkonfiguration) wirken, zeichnen sich vor allem durch Wasserstoffbrückenbindungen und die Bildung von permanenten Dipolen aus. Vereinfacht ausgedrückt bauen die Dipole durch elektrostatische Anziehungskräfte dabei zueinander Verbindungen mit unterschiedlichen Bindungsenergien, also starke und schwache Bindungsenergien, auf. Diese Theorie reicht jedoch allein nicht zur Beschreibung der Adhäsion aus, da sie keine Erklärung für hochfeste Verbindungen liefert. Physikalische Bindungen können z. B. durch Eindringen von Stoffen höherer Polarität, beispielsweise Wasser, beeinträchtigt und gelöst werden. Daher müssen noch weitere Bindungsmechanismen neben der intermolekularen Wechselwirkung von Dipolen die Adhäsionsfestigkeit beeinflussen [Bro05]. Die Diffusionstheorie behandelt die Adhäsionsmechanismen bei eng kontaktierten polymeren Werkstoffen. Dabei kommt es durch die Bewegung der Moleküle an den Grenzflächen zu einem Eindiffundieren in die jeweils andere Werkstoffoberfläche. Haftklebstoffe mit hoher molekularer Beweglichkeit zeichnen sich durch diesen Adhäsionsmechanismus aus. Die chemische Wechselwirkung bei der Adhäsion beschreibt die Haftungsvorgänge zwischen Metallen bzw. deren Oxiden und organischen Substanzen durch chemische Grenzflächenreaktionen. Dabei muss eine genaue Analyse der jeweils eingegangen chemischen Bindungen unter Betrachtung aller relevanten chemischen Aspekte im Einzelfall geklärt werden.

An dieser Stelle sei zur Adhäsion gesagt, dass ein Klebstoff sich aus einem flüssigen Zustand in einen festen Zustand wandelt und in diesem Zustand Kräfte zwischen den Festkörpern überträgt. Durch den Grenzflächenkontakt dieser Festkörper bedarf es zur Adhäsion einer Widerstandskraft, die der Kraft, die notwendig ist, um den Grenzflächenkontakt zu zerstören, entgegen wirkt [Ric04].

I.2.4.2 Übersicht über Klebstoffe und Primer

Klebstoffe lassen sich nach der Art der Aushärtung, des Basisharzes oder der Klebstoffart in verschiedene Klassen einteilen. In vielen Literaturquellen [Bro05], [Mic69] wird auf die genaue Klassifizierung eingegangen. Eine Einteilung der Klebstoffe nach ihrem Aushärtungsmechanismus ist in Abb. 20 dargestellt.

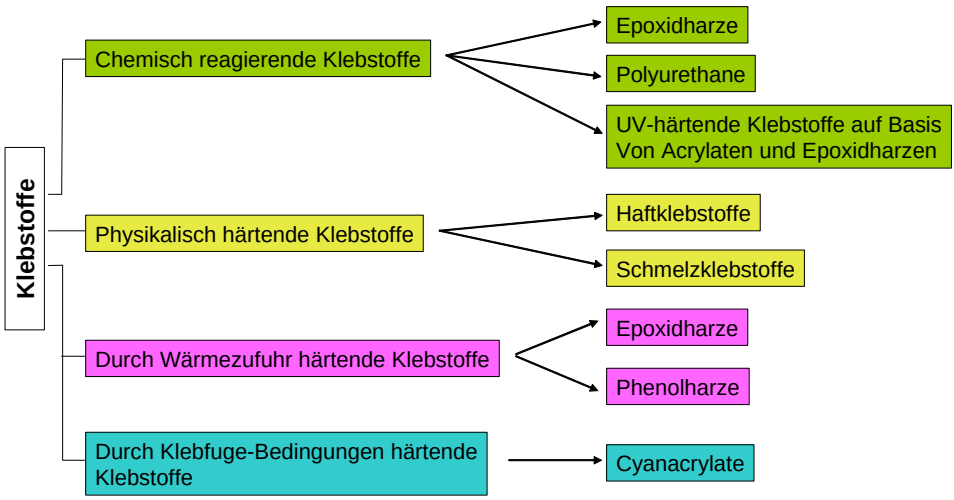


Abb. 20: Einteilung der Klebstoffe nach ihrem Aushärtungsmechanismus.

Für einige dieser Aushärtungsmechanismen sind in Tabelle 1, Kapitel II.1, die in dieser Arbeit relevanten Klebstoffe dargestellt.

Sogenannte „Primer“ sind nicht in der Einteilung der Klebstoffe genannt, können diesen aber chemisch ähneln. Primer sind verdünnte Polymerlösungen, die der Verbesserung der Adhäsion zwischen Klebstoff und Oberfläche dienen.

I.2.4.3 Acrylat- und Epoxidharz-Klebstoffe

Zum Aufbau und den Eigenschaften der unterschiedlichsten Klebstoffe gibt es in der Literatur zahlreiche Quellen. Mit Hinblick auf die Aushärtebedingungen sind die Acrylat- und Epoxidharz-Klebstoffe die beiden für diese Arbeit wichtigsten Klebstofftypen.

Cyanacrylate, besser bekannt als Sekundenkleber, gehören zur Gruppe der chemisch härtenden Acrylatklebstoffe. Aufgrund der Struktur der Monomere im Cyanacrylat wird der Härtungsprozess durch die Feuchte bestimmt, die in der Klebefuge (< 0,1 mm) vorherrscht. Ist der Cyanacrylat-Klebstoff ausgehärtet, bildet dieser einen Thermoplast, der spröde ist und sich kaum plastifizieren lässt. Um das hohe Kriechverhalten von Thermoplasten auszugleichen, werden die Cyanacrylat-Klebstoffe durch Vernetzer modifiziert. Cyanacrylat-Klebstoffe lassen sich einfach verarbeiten [Bro05]. Zur schnellen Fixierung von optischen Fasern sind diese gut geeignet, jedoch nehmen die Cyanacrylat-Klebstoffe wenig Verformung auf und platzen entsprechend bei sehr hohen Dehnung (einige Prozent), vor allem bei dynamischer Belastung, von den Probekörpern ab.

Die Familie der Epoxidharz-Klebstoffe ist sehr groß. Eine der wichtigsten Epoxidharzgruppen beinhaltet Bisphenol A. Epoxidharze können auf zwei unterschiedliche Weisen miteinander reagieren. Zum einen setzt die Härtungsreaktion durch Erhöhung der Temperatur ein, zum anderen wird durch Bestrahlung (z. B. UV-Licht) der Härtungsprozess initiiert. Beim Härtungsprozess wird zunächst nach Ende der Topfzeit ein Gel-Stadium durchlaufen. Die Topfzeit beschreibt die Zeitspanne zwischen Anmischen der Komponenten des Klebstoffs und dem Ende der Verarbeitbarkeit. Dabei ist der Klebstoff schon fest, die Polymerisation jedoch noch nicht beendet. Das Erreichen der Endfestigkeit des Klebstoffs hängt ganz von der Reaktion zwischen Harz und Härter ab. Erhöht man während des Aushärtungsprozesses von Epoxidharz-Klebstoffen die Temperatur, so beschleunigt man diesen Prozess und erreicht eine im Vergleich zur Kalthärtung höhere Endfestigkeit [Bro05]. Kurzfristig wird dabei der Klebstoff auch verflüssigt, so dass sich dieser gut an optischer Faser und Bauteil anpasst bzw. entsprechend in eine vorgefertigte geometrische Form bringen lässt. Epoxidharz-Klebstoffe eignen sich sehr gut zum verkleben von optischen Fasern, da sie ein zäheres Verhalten als Cyanacrylat-Klebstoffe aufweisen. Aufgrund der enormen Vielfalt an unterschiedlichen, kommerziell erhältlichen Epoxidharz-Klebstoffen kann gezielt ein für die einzelnen Messbedingungen angepasster Klebstoff ausgewählt werden.

I.2.4.4 Herstellung von Klebverbindungen

Um eine den Beanspruchungen gerechte Klebverbindung zwischen Bauteilen herzustellen, sind in der Literatur zahlreiche Empfehlungen zur Gestaltung und Berechnungen von Klebver-

bindungen zu finden [End80], [Sch04], [Fau77]. Die Grundlagen für eine optimale Haftung des Klebstoffs am Bauteil bestimmen später weitestgehend die Beanspruchbarkeit und die zuverlässige Funktion der Klebverbindung. Dazu gehört in erster Linie die Vorbehandlung der Oberflächen der zu verklebenden Bauteile.

Ziel der Oberflächenvorbehandlung beim Verkleben einer optischen Faser an ein Bauteil ist es, die Oberfläche für den Klebstoff zu aktivieren. Dabei sind in mehreren Arbeitsschritten verschiedene Abläufe durchzuführen. Die Oberfläche muss zunächst vorbereitet werden, indem sie gesäubert und entfettet wird. Danach findet die eigentliche Oberflächenvorbehandlung statt. Dabei wird die Oberfläche entweder mechanisch oder chemisch bearbeitet. Bei der mechanischen Vorbehandlung wird die Oberfläche beispielsweise durch Schleifen aufgeraut. Bei der chemischen Vorbehandlung werden Oxidschichten auf Metallen z. B. durch Beizen abgetragen. Ziel der Vorbehandlung ist es, die wahre Kontaktfläche zwischen Klebstoff und Oberfläche zu vergrößern. Da die Oberfläche mit fortschreitender Zeit inaktiver wird, ist das Auftragen von Haftvermittlern vor der Klebung wichtig. Die Klebung selbst sollte möglichst zügig nach der Oberflächenvorbehandlung erfolgen [Hau02]. Grundlegende Arbeiten zur Verbesserung von Benetzbarkeit und Haftung an optischen Fasern sind bereits in [Hab03] dargestellt.

Die Qualität der Klebverbindung kann durch Benetzung der Oberfläche mit dem Klebstoff bestimmt werden. Dabei wird der Randwinkel zwischen der Klebstofftropfenoberfläche und der Bauteiloberfläche beim Auftreffen auf die Bauteiloberfläche gemessen. Die Oberflächenspannungen zwischen dem Klebstofftropfen und der Bauteiloberfläche bestimmen den Randwinkel. Ist der Randwinkel größer als 90°, kommt es zu keiner oder zu einer nicht vollständigen Benetzung. Findet keine vollständige Benetzung statt, so ist die Grenzflächenenergie zwischen Oberfläche und Klebstofftropfen größer als die Oberflächenenergie der Oberfläche zur Umgebung. Es kommt zu keiner intermolekularen Wechselwirkung zwischen Klebstoff und Oberfläche und somit entsteht keine Haftung [Bro05]. Eine ideale Benetzung wird erreicht, wenn der Randwinkel kleiner als 30° ist.

I.2.4.5 Eigenschaften von Klebverbindungen

Die Eigenschaften von Klebverbindungen hängen im Einzelnen von den verwendeten Klebstoffen ab und müssen durch Prüfung nach Norm ermittelt werden. Das mechanische Verhalten von Klebverbindungen, also Festigkeit und Verformbarkeit, werden in Abhängigkeit von Zeit, Last und Temperatur untersucht. Die Festigkeit, also die maximale Spannung, der eine Klebverbindung ausgesetzt sein kann, wird mittels Zugscherversuchen ermittelt. Bei nichtmittiger Last wird durch Schälversuche eine Aussage über die Belastbarkeit von Klebverbindungen erreicht. Die so ermittelten Kennwerte lassen sich allerdings nicht auf andere Oberflächenzu-

stände der Bauteile oder Klebungsdimensionen umrechnen. Vom Deutschen Institut für Normung e. V. werden die meisten Prüfverfahren zur Ermittlung von Klebstoffkennwerten für verschiedene Klebverbindungen als DIN-Normen (z. B. [DIN69], [DIN55], [DIN56]) herausgegeben.

Das Langzeitverhalten von Klebverbindungen muss ebenfalls im Einzelfall geprüft werden, da Klebstoffe ohne Lasteinwirkung durch Änderung der Umgebungsbedingungen ebenfalls ihre Eigenschaften ändern können. Zur Bestimmung des Langzeitverhaltens werden verschiedene Alterungssimulationen durchgeführt. Dazu gehören Klimawechseltests, Salzsprühtests und der Freibewitterungstest (Korrosions-, Feuchtigkeits- und Temperaturwechselbelastung). Aufgrund der Vielzahl der zu untersuchenden und Einfluss nehmenden Parameter auf die Änderung der Anfangsfestigkeit der Klebverbindung in Abhängigkeit von der Oberflächenvorbehandlung ist auch beim Langzeitverhalten keine globale Aussage für verschiedene Klebverbindungen möglich.

Prinzipiell ist einer der größten Schädigungsmechanismen in Klebungen, die das Langzeitverhalten beeinflussen, die Feuchte. Es muss beachtet werden, dass durch das Eindringen von Feuchte zur Klebverbindung eine Plastifizierung des Klebstoffs erfolgt. Des Weiteren kann es durch Feuchte zur Ablösung des Klebstoffs von der Bauteiloberfläche kommen. Schädigungen des Bauteils können auch durch die im Wasser gelösten korrosiven Elemente (z. B. Chloridionen) ausgelöst werden. In Abschnitt II Kapitel 8 wird im Einzelnen auf die Feuchteproblematik bei verklebten faseroptischen Sensoren eingegangen.

I.3 Validierung

Der Begriff „Validierung“ ist in der DIN EN ISO/IEC 17025:2005 in Abschnitt 5.4.5.1 definiert. „Die Validierung ist die Bestätigung durch Untersuchung und Bereitstellung eines Nachweises, dass die besonderen Anforderungen für einen speziellen beabsichtigten Gebrauch erfüllt werden.“ [DIN05]. Validierung ist somit das Durchführen einer Prüfaufgabe, mit der geprüft werden kann, ob die Kundenanforderungen, also der „spezielle beabsichtigte Gebrauch“, erfüllt werden. Nach der vom Deutschen Akkreditierungsrat (DAR) 1996 herausgegebenen Empfehlung ATF/27/96 bedeutet Validierung in Bezug auf ein Prüfverfahren, dass nachgewiesen werden muss, dass dieses Prüfverfahren geeignet ist, um die vorgegebene Prüfaufgabe zu erfüllen [DAR96]. Um eine Validierung durchführen zu können, müssen also 3 Punkte erfüllt werden [DAR96]:

- Das Prüfverfahren muss charakterisiert werden.
- Die Qualität des Prüfverfahrens muss mit den Qualitätsanforderungen des Kunden verglichen werden.
- Es muss ein Nachweis über die Erfüllung der Qualitätsanforderungen erbracht werden.

Bevor eine Validierung durchgeführt werden kann, muss also der „spezielle beabsichtigte Gebrauch“ des Kunden klar definiert sein und die Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit des Prüfverfahrens müssen bekannt sein. Validiert werden müssen nach [DIN05] Verfahren, die zur Prüfung entwickelt worden sind und nicht in normativen Dokumenten festgelegt sind.

Für das hier entwickelte Prüfverfahren zur Bestimmung der Dehnungsübertragung vom Messobjekt auf den faseroptischen Sensor und den in dieser Arbeit aufgebauten Prüfplatz muss daher eine Charakterisierung des Prüfverfahrens durchgeführt werden, um die Eigenschaften und Verfahrensmerkmale zu bestimmen. Die zu bestimmenden Verfahrensmerkmale sind im wesentlichen Messunsicherheit, Präzision, Wiederholbedingungen, Prüfbereich, Linearitätsbereich, Empfindlichkeit und Selektivität [DAR96]. Diese Verfahrensmerkmale müssen für den zu erwartenden und definierten Anwendungsbereich des Prüfverfahrens ermittelt werden.

Zur Bestimmung der Charakteristika von Prüfverfahren können die Einfluss nehmenden Parameter untersucht werden. Dabei werden die Einflussparameter, wie z. B. Temperatur oder Luftfeuchte, systematisch variiert und an verschiedenen Prüfobjekten angewendet und quantifiziert. Dadurch erhält man für Vergleichsbedingungen die Streuung der Ergebnisse und kann die Messunsicherheit nach GUM (ISO Guideline to the Expression of Uncertainty in Measurement) [ISO08] bestimmen.

Ist das Prüfverfahren charakterisiert, so ist es für die Validierungsaufgaben notwendig, dass eine Standardarbeitsanweisung (Standard Operating Procedure SOP) erstellt wird. Dafür muss eine Dokumentation mit einer Beschreibung des Prüfablaufs angefertigt werden und die Prüfung muss durch eine weitere Person unter den angewandten Prüfkriterien durchgeführt und bestätigt werden.

II Untersuchung Einfluss nehmender Parameter auf die Dehnungsübertragung zur Entwicklung einer Validierungsmethodik

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Experimente erläutert, um die zur Beschreibung der Dehnungsübertragung Einfluss nehmenden Parameter zu charakterisieren. Dazu wurden zunächst Klebstoffe charakterisiert. Danach wurden FBG auf Proben appliziert und die Dehnungsübertragung mit Referenzverfahren unter spezifizierten Umgebungsbedingungen bestimmt. Diese Umgebungsbedingungen und auch die aufgebrachte Last wurden systematisch variiert, so dass eine Aussage über die Dehnungsübertragung unter speziellen Messbedingungen möglich ist.

II.1 Ermittlung von Klebstoffkennwerten

In Anlehnung an die in Abschnitt I, Kapitel 2.4 aufgeführten Merkmale und Eigenschaften von Klebstoffen wurden in dieser Arbeit einige Untersuchungen zur Bestimmung dieser Eigenschaften durchgeführt.

Es wurde eine Auswahl an Klebstoffen getroffen, die für die Applizierung von FBG-Dehnungssensoren auf verschiedene Materialien, insbesondere Aluminium und CFK bzw. GFK, angewendet und analysiert wurden. Bei der Bewertung und der Auswahl der Klebstoffe sind sowohl mechanische Parameter (E-Modul) als auch das thermische Verhalten und die Abhängigkeit der mechanischen Parameter von der Temperatur von Interesse. Der E-Modul wird für die Berechnung der Dehnungsübertragungsrate im Modell benötigt. Der thermische Ausdehnungskoeffizient, die Glasübergangstemperatur und das Verhalten des Klebstoffs außerhalb des spezifizierten Temperaturbereichs bestimmen die Einsetzbarkeit des Klebstoffs.

Neben diesen Auswahlkriterien für Klebstoffe sind auch die Aushärtungsparameter des Klebstoffs ein wichtiges Kriterium. Vor allem die Topfzeit und die Viskosität spielen bei Applizierungen von FBG-Dehnungssensoren an schwer zugänglichen Stellen oder bei Über-Kopf-Applizierung eine praktische Rolle. Ebenfalls ist bei der Auswahl des Klebstoffs die chemische Beständigkeit des Coatings gegenüber den Inhaltsstoffen des Klebstoffs zu beachten.

In Tabelle 1 sind alle hier genutzten Klebstoffe mit ihrem Einsatzgebiet aufgeführt. Generell gilt bei allen Klebstoffen, dass die Spezifikationen der Klebstoffe und Verarbeitungsanweisungen des Herstellers zu beachten sind.

Klebstoff	**Kategorie**	**Einsatzart**
Vitralit 1517	Epoxidharz	UV-Klebstoff
Loctite Hysol 3430	2K-Epoxidharz	Konstruktionsklebstoff
Epo-Tek 353 ND	2K-Epoxidharz	Klebstoff für optische Bauteile
RS-920	Epoxidharz metallgefüllt	Konstruktionsklebstoff
Loctite 147	2K-Epoxidharz metallgefüllt	Konstruktionsklebstoff
Devcon Titanium/Steel	2K-Epoxidharz metallgefüllt	Konstruktionsklebstoff
Loctite Hysol 3450	2K-Epoxidharz metallgefüllt	Konstruktionsklebstoff
Araldite 2022	Methylmethacrylat	GFK-Klebstoff
Weicon Easy Mix	2K-Epoxidharz	Konstruktionsklebstoff
M-Bond 200	2K-Epoxidharz	DMS-Klebstoff
M-Bond AE-10	2K-Epoxidharz	DMS-Klebstoff
Z70	Cyanacrylat	DMS-Klebstoff
Kyowa CC-33A	Cyanacrylat	DMS-Klebstoff
X60	Methylmethacrylat	DMS-Klebstoff
Loctite 401	Cyanacrylat	Schnellklebstoff
Loctite 456	Cyanacrylat	Schnellklebstoff
Weicon RK-1500	2K-Epoxidharz	Konstruktionsklebstoff

Tabelle 1: Aufstellung der für diese Arbeit ausgewählten und angewendeten Klebstoffe.

II.1.1 Bestimmung des E-Moduls

In Anlehnung an das in Abschnitt I, Kapitel 2.3 erläuterte Dehnungsübertragungsmodell für oberflächenapplizierte FBG-Sensoren ist für eine Berechnung des Dehnungsübertragungskoeffizienten nach Gl. (42)

$$\varepsilon_{\mathrm{F}}(x) = \varepsilon_{\mathrm{S}} \cdot \left[1 - \frac{\sinh(kx)}{\sinh(kL)}\right], \text{ mit } k^2 = \frac{G}{E_{\mathrm{F}} \cdot d_{\mathrm{K}} \cdot r_{\mathrm{F}}}$$

die Kenntnis des Schubmoduls G des Klebstoffs notwendig. Der Schubmodul ist mit dem E-Modul des Klebstoffs und der Querkontraktionszahl ν über $G = E/(2 \cdot (1+\nu))$ gekoppelt. Demnach ist die Kenntnis des E-Moduls des Klebstoffs (und der Querkontraktionszahl) für eine Berechnung der Dehnungsübertragung sowie der Berücksichtigung weiterer Klebstoffkennwerte von wesentlicher Bedeutung.

Zur Bestimmung des E-Moduls von verschiedenen Klebstoffen wurden zunächst Mikroindentation-Versuche durchgeführt. Die instrumentierte Eindringprüfung, zu der auch die Mikroindentation gehört, ist in der Norm ISO 14577 [ISO77] beschrieben. Ein Indenter, also ein Eindringkörper (z. B. Berkovich-Pyramide), wird mit kontinuierlich anwachsender Kraft bis zu einem bestimmten Wert (unter 1 N) in das Messobjekt gedrückt, wobei gleichzeitig die Eindringtiefe des Indenters in das Messobjekt gemessen wird. Das Ergebnis dieses Tests wird durch ein Kraft-Eindringtiefe-Verhältnis beschrieben. Der elastische Eindringmodul, der mit dem E-Modul des Messobjekts vergleichbar ist, wird aus der Steigung der Entlastungskurve im Kraft-Eindringtiefe-Diagramm errechnet. Diese Versuche wurden an miniaturisierten Zugproben aus Klebstoff (Anfangsmesslänge 20 mm x Anfangsbreite 2 mm) durchgeführt. Es wurden insgesamt sechs ausgewählte Klebstoffe untersucht.

Lediglich für einen Klebstoff, Epotek 353 ND, konnte mit hinreichender Messunsicherheit der E-Modul bestimmt werden. Das Kraft-Eindringtiefe-Diagramm ist für diesen Klebstoff in Abb. 21 dargestellt. Alle weiteren Klebstoffe erzielten nicht akzeptable Streuungen in den Messwerten.

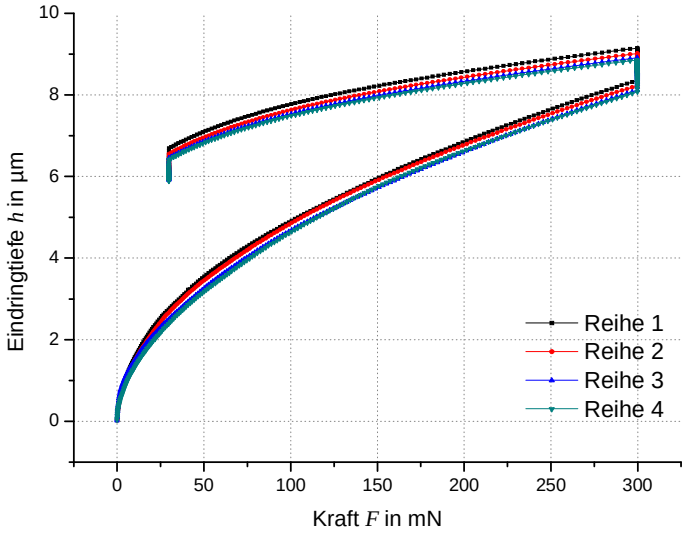


Abb. 21: Kraft-Eindringtiefe-Diagramm mit Belastungs- und Entlastungskurve des Klebstoffs Epotek 353ND. Dargestellt sind vier von elf durchgeführten Messungen.

Der elastische Eindringmodul E_{IT} kann nach [ISO77] aus dem Anstieg der Tangente an der Kraft-Eindringtiefe-Kurve bei Prüfkraftrücknahme berechnet werden, wie in Gl. (44) beschrieben.

$$E_{\mathrm{IT}} = \frac{1-(\nu_{\mathrm{S}})^2}{\frac{1}{E_{\mathrm{r}}} - \frac{1-(\nu_{\mathrm{i}})^2}{E_{\mathrm{i}}}}, \tag{44}$$

$$E_{\mathrm{r}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2C\sqrt{A_{\mathrm{p}}}}. \tag{45}$$

Dabei ist ν_{S} die Poisson-Zahl des Messobjekts, ν_{i} die Poisson-Zahl des Eindringkörpers, und E_{i} der E-Modul des Eindringkörpers. E_{r} ist der reduzierte Modul des Eindringkontaktes, der aus der Kontaktnachgiebigkeit C, also $\mathrm{d}h/\mathrm{d}F$ der Kurve für die Prüfkraftrücknahme, und der projizierten Kontaktfläche A_{p} des Eindringkörpers berechnet wird. Entsprechende Werte für ν_{i}, E_{i} und A_{p} können in [ISO77] nachgeschlagen werden. Da die Poisson-Zahl der Klebstoffe nicht bekannt ist, ist der ermittelte E-Modul der Klebstoffe also unter Vorbehalt einer Division durch $1-\nu_{\mathrm{S}}^2$ zu betrachten. Als Abschätzung für die Poisson-Zahl der Klebstoffe wird für die Angabe des E-Moduls in Tabelle 2 daher $\nu_{\mathrm{S}} = 0{,}4$ gewählt.

Für den in Abb. 21 dargestellten Klebstoff Epotek 353ND konnte ein E-Modul von 5,86 GPa mit einer Standardabweichung von ± 0,41 GPa bestimmt werden. Es wurden insgesamt elf Prüfzyklen pro Probe durchgeführt, um eine statistische Auswertung zu ermöglichen. Alle untersuchten Klebstoffe mit ihren experimentell ermittelten E-Moduli aus den Mikroindentation-Versuchen sind in Tabelle 2 dargestellt. Von den Herstellern wurden für diese Klebstoffe keine Angaben bekannt gegeben.

Klebstoff	**E-Modul (GPa)**
Epotek 353ND	5,86 ± 0,41
Metall-Epoxy-Mischung (Eigenentwicklung)	4,98 ± 1,13
RS 950-962	2,23 ± 0,50
Loctite 147-64	4,90 ± 3,72
Loctite 3430	14,85 ± 9,64
Vitralit 1517	5,86 ± 2,04

Tabelle 2: In Mikroindationversuchen experimentell ermittelte E-Moduli von einigen exemplarischen Klebstoffen.

Um auch die anderen ausgewählten Klebstoffe beurteilen zu können, wurden an diesen Indentation-Tests durchgeführt. Dabei wurden mit einer größeren Indenterspitze größere Kräfte von bis zu 40 N und größere Eindringtiefen bis einige hundert µm erzielt, so dass über einen größeren Materialbereich gemittelt werden konnte. Die großen Messunsicherheiten zeigten sich allerdings auch bei diesen Versuchen.

Die Messunsicherheiten werden vor allem durch die Eigenschaften der Klebstoffproben bestimmt. Klebstoffe mit Füllstoffen hatten sehr hohe Messunsicherheiten, da hier zum Teil die Indenterspitze auf den Füllstoff (z. B. Stahl) und bei der nächsten Messung in das umgebende Epoxidharz drückt. Bei den Versuchen musste die Oberfläche der Klebstoffe jeweils abgeschliffen werden, da bei der Aushärtung der Klebstoffproben das Harz an die Oberfläche steigt und eine Art Haut bildet, während der Füllstoff absinkt. Eine abgeschliffene Oberfläche kann Mikrorisse, die das Verhalten des Materials beeinträchtigen, aufweisen. In der Klebstoffprobe eingeschlossene Luftbläschen, die nicht immer vollständig aus der Probe zu entfernen sind, ändern ebenfalls die Materialeigenschaften, so dass bei den Mikroindentation- und Indentation-Versuchen starke Streuungen der Messwerte an den einzelnen Proben entstehen.

Große Streuungen, wie sie auch bei den Indentation-Versuchen an den Klebstoffproben festzustellen waren, ergaben sich ebenfalls bei Zugversuchen an miniaturisierten Zugproben aus Klebstoff. Die Messunsicherheiten durch die Herstellung der Probekörper und dem Einspannen der Probekörper in die Prüfmaschine führten auch hier zu keinem verwertbaren Ergebnis.

Aufgrund dieser Erkenntnisse kann zur rechnerischen Ermittlung der Dehnungsübertragung aus dem dargestellten Modell in Abschnitt I, Kapitel 2.3 nur auf Klebstoffe mit vom Hersteller bekannt gegebenem E-Modul zurückgegriffen werden.

II.1.2 Bestimmung des thermischen Verhaltens

Um Klebstoffe in ihrem Verhalten beurteilen zu können, ist es wichtig, nicht nur die mechanischen Parameter zu kennen, sondern auch die Abhängigkeit dieser mechanischen Kennwerte von der Temperatur. Für die Bestimmung des Dehnungsübertragungsverhaltens vom Messobjekt über den Klebstoff auf den FBG-Sensor ist es von wesentlicher Bedeutung, die Zustands- und Übergangsbereiche des Klebstoffgefüges in Abhängigkeit von der Temperatur zu kennen. Mit Kenntnis dieser Parameter kann eine zuverlässige Dehnungsübertragung auf den Sensor in den vorgegebenen Temperaturbereichen erreicht werden. Liegt beispielsweise die Glasübergangstemperatur des Klebstoffs in dem vorgegebenen Temperaturbereich, so ändert sich der E-Modul in diesem Bereich und es kommt bei unterschiedlichen Temperaturen zu unterschiedlichen Dehnungsübertragungen. Bei Klebstoffen, die bei Raumtemperatur aushärten, kann es dazu kommen, dass die Glasübergangstemperatur nie erreicht wird. Das bedeutet, der Klebstoff wird zwar hart, härtet aber nicht chemisch vollständig aus, sondern erstarrt nur in seinem Gefüge. Bis die Glasübergangstemperatur bei einer höheren Temperatur erreicht wird, bleibt der Klebstoff ein sich sehr langsam chemisch änderndes Material. So lange die chemischen Prozesse nicht durch einen vollständigen Aushärtungsprozess abgeschlossen sind, ändern sich in Abhängigkeit von der Zeit auch die mechanischen Parameter des Klebstoffs.

Da von vielen Klebstoffherstellern keine oder nur unzureichende Angaben über das thermische Verhalten der Klebstoffe und der Aushärtungsprozesse gemacht werden, ist es von prinzipieller Bedeutung, für die Bestimmung des Dehnungsübertragungsverhaltens der hier ausgewählte Klebstoffe experimentell verifizierte Erkenntnisse zu erlangen. Hierfür wurde zunächst von vier verschiedenen Klebstoffen der thermische Ausdehnungskoeffizient (im Folgenden abgekürzt mit der englischen Bezeichnung CTE, Coefficient of Thermal Expansion) bestimmt. Für zwei Klebstoffe war dieser vom Hersteller bekannt gegeben worden, während er bei den anderen beiden Klebstoffen nur experimentell ermittelt werden konnte.

Zur experimentellen Bestimmung des CTE wurde das digitale 3D-Bildkorrelationsverfahren Q400 der Firma Dantec Dynamics eingesetzt. Das Messprinzip des Q400 basiert auf der Bilderfassung mit einer Stereo-Kamera-Anordnung. Ein Bildkorrelations-Algorithmus bestimmt die Verschiebung und Verformung von zuvor festgelegten Facetten in Relation zu einem Referenzbild des Objekts im unverformten Zustand. Daraus können dann die Dehnungen mit einer Auflösung von 1/100 Pixel errechnet werden. Bei dem hierfür aufgebauten Messplatz wurden die Klebstoffproben auf einer verschließbaren Heizplatte positioniert, die sowohl erhitzt als auch mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden konnte. Der Aufbau des genutzten Messplatzes der Firma Dantec Dynamics ist in Abb. 22 dargestellt..

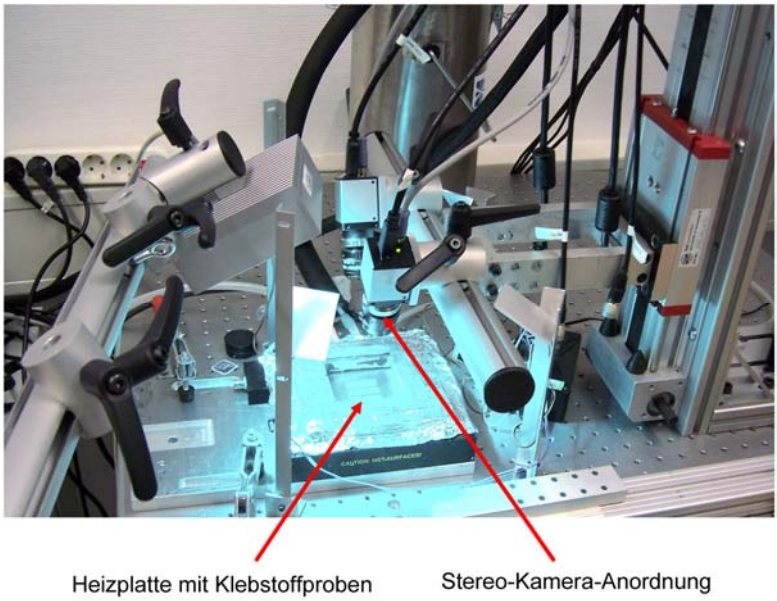


Abb. 22: Messplatz der Firma Dantec Dynamics zur Bestimmung des CTE mittels digitaler 3D-Bildkorrelation.

Alle Klebstoffproben wurden nach Herstellerangaben hergestellt, ausgehärtet und innerhalb des vorgeschriebenen Temperatureinsatzbereichs getestet. Von den untersuchten Klebstoffen zeigte neben Araldite 2022 lediglich der Klebstoff Epotek 353 ND über den untersuchten Bereich von -20 °C bis +80 °C einen konstanten CTE von (53 ± 2) ppm/K. Alle weiteren untersuchten Klebstoffe zeigten über diesen Temperaturbereich keine konstante Steigung, wie beispielhaft am Klebstoff Loctite Hysol 3450 in Abb. 23 dargestellt.

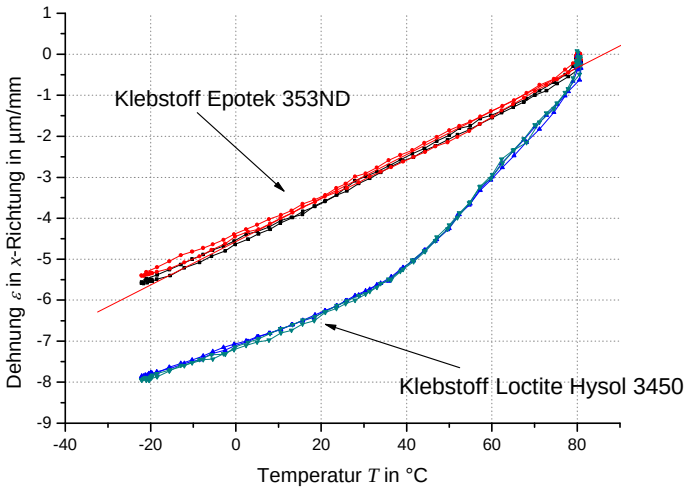


Abb. 23: Gemessener Dehnungs-Temperatur-Verlauf in Längsrichtung (x) der Proben von zwei verschieden Klebstofftypen. Dargestellt ist sowohl die Aufheiz- als auch Abkühlphase. Von den Klebstoffen Epotek 353 ND und Loctite Hysol 3450 ist jeweils das Verhalten von zwei Proben graphisch dargestellt.

Es wurden für die einzelnen Proben sowohl die Aufheiz- als auch die Abkühlphasen durchlaufen. Die Versuche wurden bei einer Temperaturänderungsrate von 5 K/min durchgeführt. Bei dem in Abb. 23 dargestellten Klebstoff Loctite Hysol 3450 ist ein deutlicher Knick in der Dehnungs-Temperatur-Kurve zu erkennen. Es wurde angenommen, dass genau hier die Glasübergangstemperatur T_G liegt und der Klebstoff oberhalb von ca. 40 °C weicher wurde. Vermutlich war der Klebstoff durch die Aushärtung bei Raumtemperatur erst bei Erhöhen der Temperatur nachgehärtet. Offenbar lag bei Raumtemperatur nur ein erstarrtes Klebstoffgefüge vor und eine vollständige chemische Aushärtung fand nicht statt. In Tabelle 3 sind alle experimentell ermittelten CTE im Vergleich zu den von den Herstellern bekannt gegebenen CTE der hier untersuchten Klebstoffe dargestellt. Bei zwei Klebstoffen müssen zwei CTE angegeben werden, jeweils unterhalb und oberhalb der Glasübergangstemperatur.

Klebstoff	**CTE Hersteller (ppm/K)**	**CTE unterhalb T_G (ppm/K)**	**CTE oberhalb T_G (ppm/K)**
Loctite Hysol 3450	-	34 ± 1	99 ± 2
Araldite 2022	-	76 ± 3	
Weicon Easy-Mix S	50	44 ± 1	85 ± 1
Epotek 353 ND	54	53 ± 2	

Tabelle 3: Experimentell ermittelte CTE verschiedener Klebstoffe mittels digitaler 3D-Bildkorrelation.

Eine genauere Untersuchung der hier aufgezeigten Phänomene wurde durch eine dynamisch-mechanische Analyse (DMA) durchgeführt. Dabei konnten die einzelnen Zustands- und Übergangsbereiche des Klebstoffgefüges bestimmt und eine Aussage über den Aushärtungsgrad und die Glasübergangstemperatur getroffen werden. Bei der DMA wird ein Klebstoff-Probekörper als Single-Cantilever eingespannt und eine sinusförmige mechanische Deformation unter veränderten Temperaturbedingungen aufgebracht. Die entsprechende Kraft wird gemessen. Die aufgebrachte Deformation hat also eine entsprechende Spannung zur Folge, die nach Amplitude und Phase ausgewertet wird. Bei linear-viskoelastischen Werkstoffen, wie Klebstoffen, tritt eine Phasenverschiebung δ zwischen aufgebrachter Deformation und ermittelter Spannung auf. Aus dem Quotienten von Spannungs- und Verformungsamplitude lässt sich der komplexe E-Modul E^* des Messobjekts bestimmen. Der komplexe E-Modul ist in Gl. (46) definiert:

$$\left|E^*\right| = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A} = \sqrt{\left[E'(\omega)\right]^2 + \left[E''(\omega)\right]^2} \,. \tag{46}$$

Dabei ist der Speichermodul mit E' und der Verlustmodul mit E'' bezeichnet, und beide ergeben sich nach Gl. (47) und (48) zu:

$$E'(\omega) = \left|E^*\right| \cdot \cos\delta \,, \tag{47}$$

$$E''(\omega) = \left|E^*\right| \cdot \sin\delta \,. \tag{48}$$

Durch Erweichen des Messobjekts mit steigender Temperatur erhöhen sich die Molekülbewegungen und das Maximum des Verlustmoduls stellt den Zustand dar, bei dem die Moleküle gerade der schwingenden Beanspruchung folgen können, so dass eine maximale Energie als innere Reibung und nichtelastische Verformung verloren geht [Ehr99]. Die Glasübergangstemperatur kann also durch das Maximum des Verlustmoduls wiedergegeben werden, wie in Abb. 24 dargestellt. Das Maximum des Verlustmoduls entspricht dem Wendepunkt des Speichermoduls. Da die Glasübergangstemperatur von der Frequenz der aufgebrachten Deformation abhängig ist, wurden bei der DMA verschiedene Frequenzen, nämlich 1 Hz, 3,33 Hz und 10 Hz verwendet.

Für den zuvor schon beschriebenen Klebstoff Loctite Hysol 3450 ist in Abb. 24 der aus der DMA errechnete Speichermodul und der Verlustmodul des Klebstoffs in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Speichermodul mit zunehmender Temperatur stark abfällt. Im Bereich des Glasübergangs ist der Klebstoff lederartig und der Verlustmodul nimmt seinen höchsten Wert bei einer Belastung von 1 Hz bei 41 °C an. Dies bedeutet, dass bei dieser Temperatur eine chemische Änderung des Materials stattfindet; das

ist die Glasübergangstemperatur. Oberhalb dieser Temperatur wird der Klebstoff weichelastisch gummiartig. Bei dem Klebstoff Loctite Hysol 3450 liegt die Glasübergangstemperatur also bei einer Frequenz von 1 Hz bei 41 °C, was die beiden unterschiedlichen CTE für hohe und niedrige Temperaturen bei der Analyse mit dem Q400 erklärt.

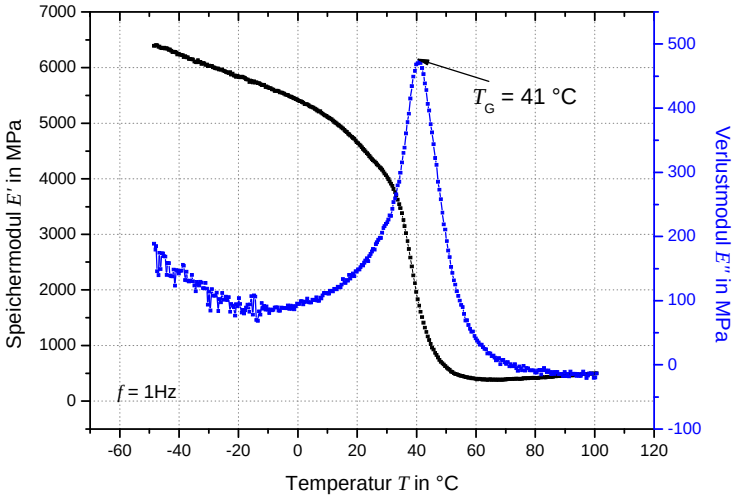


Abb. 24: Verlust- und Speichermodul des Klebstoffs Loctite Hysol 3450 in Abhängigkeit von der Temperatur bei 1 Hz.

Deutlich ist dies noch einmal in Abb. 25 dargestellt. Verlängert man die beiden Dehnungsanstiege des Klebstoffs Loctite über der Temperatur, so treffen sich diese in der Glasübergangstemperatur, was auch im Verlustmodul zu erkennen ist.

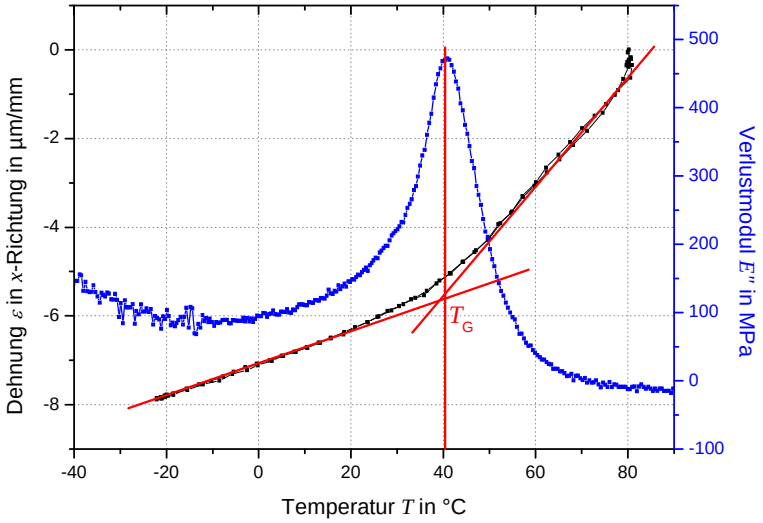


Abb. 25: Darstellung der Glasübergangstemperatur des Klebstoffs Loctite Hysol 3450 als Funktion des Verlustmoduls E'' und der beiden CTE aus der ermittelten Dehnung (vgl. Abb. 23).

Für die weiteren mit der DMA untersuchten Klebstoffe sind in Tabelle 4 die ermittelten Glasübergangstemperaturen bei den einzelnen Frequenzen dargestellt. Das Verhalten des Klebstoffs bei der DMA hängt von der Frequenz der aufgebrachten Deformation ab. Je höher die Frequenz, desto weniger kann die Bewegung der Polymerketten der Wechselbelastung folgen. Der Klebstoff verhält sich also bei gleich bleibender Temperatur mit zunehmender Frequenz steifer, und der Glasübergangsbereich verschiebt sich zu höheren Temperaturen.

Klebstoff	**T_G (°C) nach Verlustmodul bei f = 10 Hz**	**T_G (°C) nach Verlustmodul bei f = 3,3 Hz**	**T_G (°C) nach Verlustmodul bei f = 1 Hz**
Loctite Hysol 3450	46	45	41
Araldite 2022	106	104	98
Weicon Easy-Mix S	46	45	44
Epotek 353 ND	110	108	106
Toolkraft	28	25	22
JB Weld Kwik	115	-	-

Tabelle 4: Aus DMA ermittelte Glasübergangstemperaturen für ausgewählte Klebstoffe.

Bei der Auswahl der Klebstoffe für sensorische Anwendungen ist also darauf zu achten, dass der Klebstoff nicht nur „fest“ wird, sondern vollständig chemisch ausgehärtet ist. Ansonsten kann sich die Glasübergangstemperatur in Abhängigkeit von den Temperaturbedingungen bei der Nutzung der applizierten Sensoren verschieben, und es kommt zu einer Änderung der mechanischen Parameter des Klebstoffs. Dies hat signifikanten Einfluss auf die Dehnungsübertragung.

II.2 Bestimmung von Klebstoffschichtdicken

Der Einfluss der Klebstoffschichtdicke auf den Dehnungsübertragungskoeffizienten ist bereits im Dehnungsübertragungsmodell in Abschnitt I, Kapitel 2.3 theoretisch beschrieben worden. Zur Herstellung der Klebstoffgeometrie wird eine Stempelform eingesetzt, mit dem reproduzierbar eine bestimmte Klebstoffform (Abb. 26 unten) erstellt werden kann. Durch Gefügeschliffe, wie in Abb. 26 dargestellt, wurde die Schichtdicke der Klebstoffe überprüft.

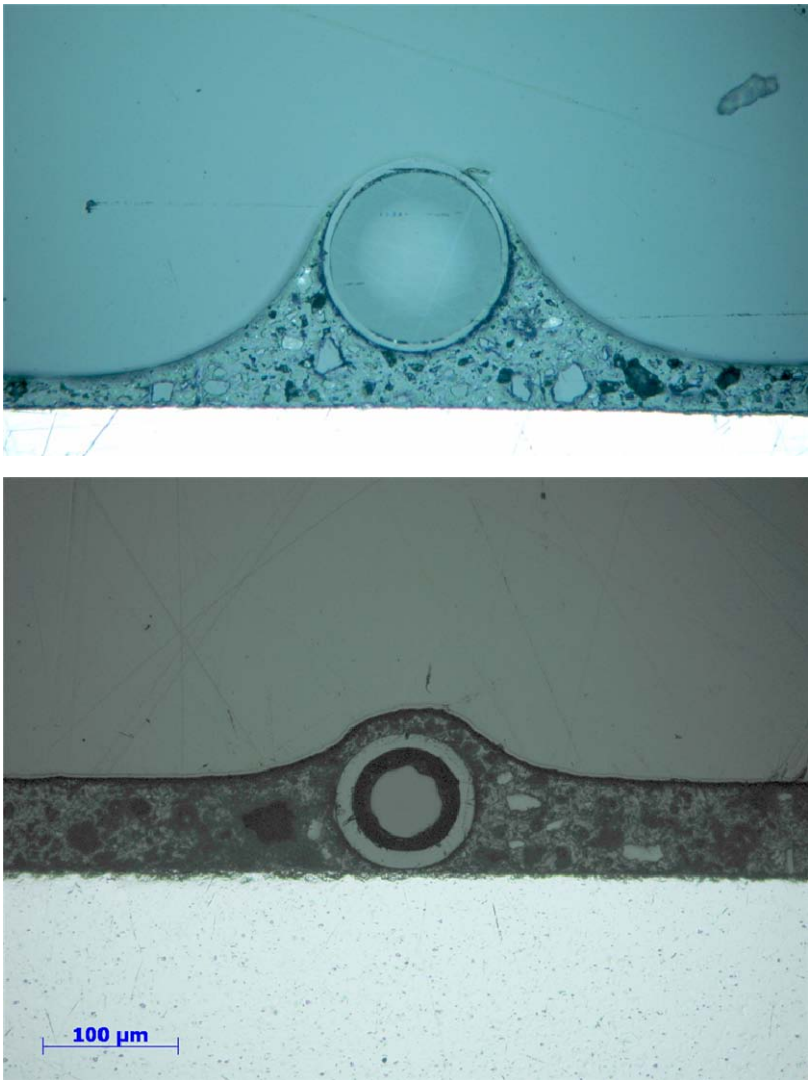


Abb. 26: Gefügeschliffe von zwei applizierten FBG-Sensoren mit unterschiedlichen Klebstoffgeometrien. Oben: halb eingebettete Variante, unten: voll eingebetteter FBG-Sensor.

Durch eine spätere konstruktive Modifikation der Stempelform können verschiedene Klebstoffschichtdicken erreicht werden, so dass mit dem in Abschnitt III vorgestellten Validierungsmessplatz die experimentell ermittelte Dehnung bei verschiedenen Klebstoffgeometrien mit den errechneten Werten aus dem Dehnungsübertragungsmodell verglichen werden können.

II.3 Temperatur- und Dehnungsentkopplung bei FBG-Sensoren

In Abschnitt I, Kapitel 2.2 wurde bereits mathematisch der Zusammenhang zwischen einer Temperaturänderung und der Änderung der Bragg-Wellenlänge eines FBG dargestellt. Dieser Zusammenhang gilt nur bei FBG-Sensoren, die unappliziert und keiner mechanischen Dehnung ausgesetzt sind. Anwendung findet dies bei FBG-Temperatursensoren, bei der die Faser an einem Punkt fixiert wird und das Ende der Faser frei beweglich ist. Im Falle eines FBG-Temperatursensors wird die Abhängigkeit der Bragg-Wellenlängen-Änderung von der Temperatur als Temperaturempfindlichkeit bezeichnet. Dabei führt eine Änderung einer Eingangsgröße, in diesem Falle die Temperatur, zu einer direkten Änderung der Ausgangsgröße, also der Bragg-Wellenlänge.

Im Falle eines FBG-Dehnungssensors beschreibt jedoch der Temperaturgang das Verhältnis der Bragg-Wellenlänge zu einer Störgröße, der Temperatur. Um aus der Bragg-Wellenlänge die für die Beschreibung der Dehnungsübertragung notwendige Information über die mechanische Dehnung zu erhalten, ist zunächst die Kenntnis des Temperaturgangs des FBG-Sensors erforderlich. Mit dieser Information kann dann die mechanische Dehnung aus der Bragg-Wellenlänge berechnet werden. Gemäß [VDI60] ist der Temperaturgang eines FBG-Dehnungssensors als Änderung der Bragg-Wellenlänge bezogen auf eine Temperaturänderung ohne einen Dehnungseintrag definiert. Soll ein FBG-Sensor als Dehnungssensor auf der Oberfläche eines Messobjekts eingesetzt werden, so erfahren Sensor und Messobjekt eine Dehnung ε, die sich aus der mechanischen Dehnung ε_{m} und der Wärmedehnung ε_{T} des Messobjekts zusammensetzt:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\mathrm{m}} + \varepsilon_{\mathrm{T}} . \tag{49}$$

Die Wärmedehnung des Messobjekts wird mit dem Wärmeausdehnungskoeffizienten α_{p} zu $\varepsilon_{\mathrm{T}} = \alpha_{\mathrm{p}} \cdot \Delta T$ berechnet. Für den FBG-Dehnungssensor ergibt sich mit Gl. (6) und Gl. (17) $\Delta\lambda_{\mathrm{B}} / \lambda_{\mathrm{B}} = K_{\varepsilon} \cdot \varepsilon + K_{\mathrm{T}} \cdot \Delta T$, so dass gilt [Kre]:

$$\frac{\Delta\lambda_{\mathrm{B}}}{\lambda_{\mathrm{B0}}} = K_{\varepsilon} \cdot \left(\varepsilon_{\mathrm{m}} + \alpha_{\mathrm{p}} \cdot \Delta T\right) + K_{\mathrm{T}} \cdot \Delta T . \tag{50}$$

Zur Bestimmung der mechanischen Dehnung muss also zunächst der Wärmeausdehnungskoeffizient des Messobjekts bestimmt und die Änderung des Brechungsindexes in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt werden. Der Wärmeausdehnungskoeffizient des Glases ist sehr gering gegenüber dem des Bauteils und kann hier vernachlässigt werden; die größte Änderung in der Bragg-Wellenlänge wird durch die thermische Abhängigkeit des Brechungsindexes bewirkt. Wird keine mechanische Last auf das Messobjekt aufgebracht, so kann der Faktor K_{T}

bei Kenntnis des Wärmeausdehnungskoeffizienten α_P wie folgt ermittelt werden: $\Delta\lambda_B / \lambda_{B0} = (K_\varepsilon \cdot \alpha_P + K_T) \cdot \Delta T$. Wichtig bei der Berechnung der mechanischen Dehnung ist, dass sich, ausgehend von verschiedenen Temperaturen, die Bezugs-Bragg-Wellenlänge λ_{B0} ändert. Praktisch wird oft ein FBG-Sensor, der vom Messobjekt mechanisch entkoppelt ist, als Temperatursensor eingesetzt. Die Änderung der Bragg-Wellenlänge des FBG-Temperatursensors wird dann mit der des FBG-Dehnungssensors, der von Temperatur und Dehnung beeinflusst wird, verrechnet. Damit erhält man die gewünschten Dehnungswerte des FBG-Dehnungssensors.

Die Alternative wäre ein temperaturkompensierter FBG-Dehnungssensor, wie es auch bei DMS üblich ist. Diese sind zwar auf verschiedenste Weisen bereits an Universitäten und Forschungseinrichtungen entwickelt [Hua03], [Tan03], [Har98], aber bisher kaum kommerzialisiert oder standardisiert worden. Dem Anwender dieser Technik bleibt bisher nur übrig, selbst für die jeweiligen Messstellen eine entsprechende Temperaturkompensation vorzusehen.

II.4 Ermittlung des Dehnungsübertragungskoeffizienten unter statischer Belastung

Zur experimentellen Charakterisierung der Einflüsse auf die Dehnungsübertragung vom Bauteil auf den FBG-Dehnungssensor wurden Zugversuche durchgeführt. Dabei wurden zunächst nur Aluminiumproben, wie sie im Luftfahrtbereich Anwendung finden, als Messobjekte verwendet. Um eine Wiederholbarkeit der Messungen sicherzustellen, wurden die Proben nur im elastischen Bereich bis 70 % der Dehngrenze $R_{p0,2}$ des Werkstoffs beansprucht. Das wichtigste Kriterium für den Einsatz der Klebstoffe ist die zuverlässige Dehnungsübertragung im zu betrachtenden Temperaturbereich von -60 °C bis +80 °C. Dieser Temperaturbereich entspricht den extremen Anforderungen der Luftfahrtindustrie. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden statische Lasten aufgebracht und die Temperaturen gleichzeitig systematisch verändert. Untersucht wurde dabei das Verhalten von FBG-Sensoren mit Acrylat- und Ormocer®-Coating, sowie Fasern ohne Coating, um den zusätzlichen Einfluss des Coatings auf die Dehnungsübertragung zu analysieren. Neben den Sensor-Coatings und den Klebstoffen wurde auch die punktuelle Anbindung bzw. die vollflächige Applizierung der Sensoren hinsichtlich der Dehnungsübertragung untersucht. Für diese statischen Versuche wurden DMS zur Referenzierung genutzt. Eine Referenzierung mit DMS oder Extensometer zur Ermittlung von Dehnungen sind zurzeit die gängigsten Verfahren. Dabei wird die Dehnung der FBG-Sensoren mit der entsprechenden Messunsicherheit der DMS bestimmt. Der große Nachteil dieser Art der Referenzierung liegt jedoch darin, dass nicht spezifiziert werden kann, ob beispielsweise der Klebstoff des FBG-Dehnungssensors nicht genug Dehnung überträgt, dieser zu spröde oder zu weich ist, oder ob der Sensor nicht mehr am Messobjekt haftet.

Einfluss des Coatings auf den Dehnungsübertragungskoeffizienten

Da die FBG-Sensoren mit den unterschiedlichen Coatings mit derselben Technik und jeweils dem gleichen Klebstoff auf den Proben appliziert wurden, konnte das Verhalten der FBG-Sensoren bezüglich des Coatings miteinander verglichen werden. In Abb. 27 ist die relative Bragg-Wellenlängenänderung von FBG-Sensoren mit verschiedenen Coatings bei Applizierung mit dem Klebstoff Kyowa CC-33A im Vergleich zur Dehnung der DMS auf den Messobjekten untersucht worden. Dabei wurden die drei Temperaturstufen -60 °C, 23 °C und +85 °C jeweils konstant gehalten, während die Probe in der Zugprüfmaschine belastet wurde. Dargestellt sind in Abb. 27 für das jeweilige Coating zusammenfassend die Messdaten der Bragg-Wellenlängenänderung bezogen auf die aufgebrachte Dehnung aus allen drei Temperaturstufen in einer Messkurve. Für jedes FBG wurden die Messdaten gemittelt und die entsprechende Ausgleichsgerade eingezeichnet. Aus der Ausgleichsgeraden wurde die Steigung berechnet,

die dem Dehnungsübertragungskoeffizienten, also der relativen Bragg-Wellenlängenänderung bezogen auf die Dehnung des DMS, entspricht.

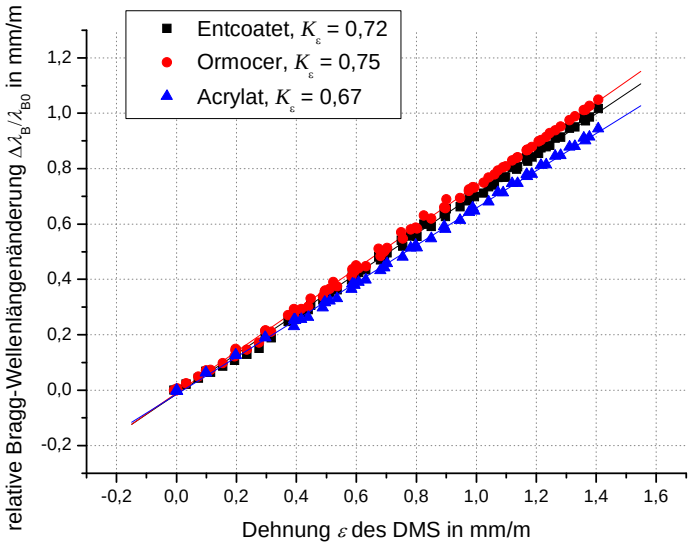


Abb. 27: Verhalten von FBG-Sensoren mit verschiedenen Coatings über einen Dehnungsbereich von 1,4 mm/m. Die FBG-Sensoren wurden mit Kyowa CC-33A appliziert.

Deutlich ist zu erkennen, dass das FBG mit Acrylat-Coating den schlechtesten Dehnungsübertragungskoeffizient von 0,67 erreicht, während das Ormocer®-Coating eine bessere Dehnungsübertragung als das entcoatete FBG aufweist. Vermutlich liegt hier eine sehr gute Haftung zwischen Ormocer® und dem Klebstoff vor. Im Temperaturbereich von -60 °C bis +85 °C zeigten alle drei Coatings keine Dehnungsübertragungsunterschiede, was darauf schließen lässt, dass sich der Klebstoff in diesem Temperaturbereich chemisch nicht verändert und somit in seinen mechanischen Parametern konstant bleibt. Bei einem anderen Klebstofftyp konnte ebenfalls ein ähnliches Verhalten der Dehnungsübertragung der unterschiedlichen Coatings festgestellt werden, wie in Abb. 28 dargestellt.

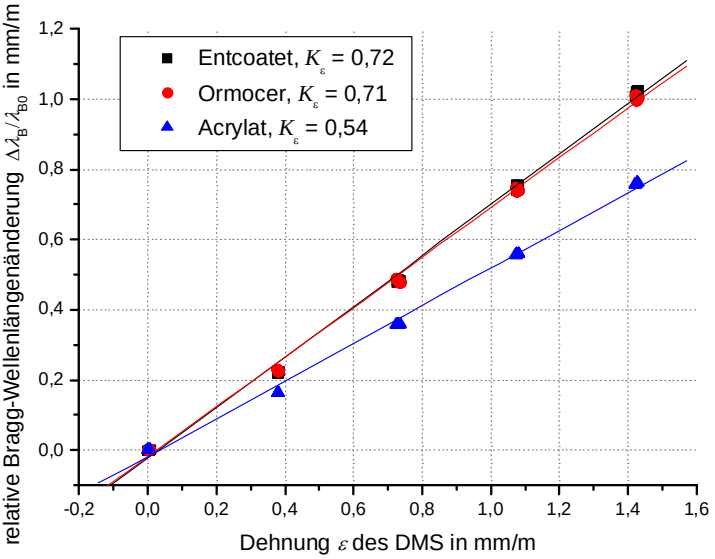


Abb. 28: Verhalten von FBG-Sensoren mit verschiedenen Coatings über einen Dehnungsbereich von 1,4 mm/m bei einer Temperatur von 23 °C. Die FBG-Sensoren wurden mit Loctite 147 appliziert.

Bei der Dehnungsübertragung mit dem Klebstoff Loctite 147 ist aus der Steigung der Ausgleichsgeraden zu erkennen, dass das FBG mit Acrylat-Coating einen sehr schlechten Dehnungsübertragungskoeffizient von 0,54 aufweist. Das FBG mit Ormocer®-Coating und das entcoatete FBG dagegen zeigen eine sehr gute Haftung mit einem guten Dehnungsübertragungskoeffizienten von 0,71 bzw. 0,72. Unabhängig von der Wahl des Klebstoffs wird mit einem relativ dicken und vergleichsweise weichen Coating, wie dem Acrylat, eine schlechte Dehnungsübertragung erzielt. FBG-Sensoren ohne Coating oder mit einem dünnen und spröden Coating wie dem Ormocer®, erreichen dagegen eine gute Dehnungsübertragung.

Einfluss der Temperatur

Betrachtet man den Dehnungsübertragungskoeffizienten für die FBG-Sensoren über den gesamten Temperaturbereich, so stellt man bei Applizierung mit dem Klebstoff Loctite 147 fest, dass dieser sich mit der Temperatur verändert. Der Klebstoff wird bei niedrigen Temperaturen spröder und überträgt die Dehnung besser als bei höheren Temperaturen. Beispielhaft ist dies in Abb. 29 für das mit Acrylat gecoatete FBG dargestellt.

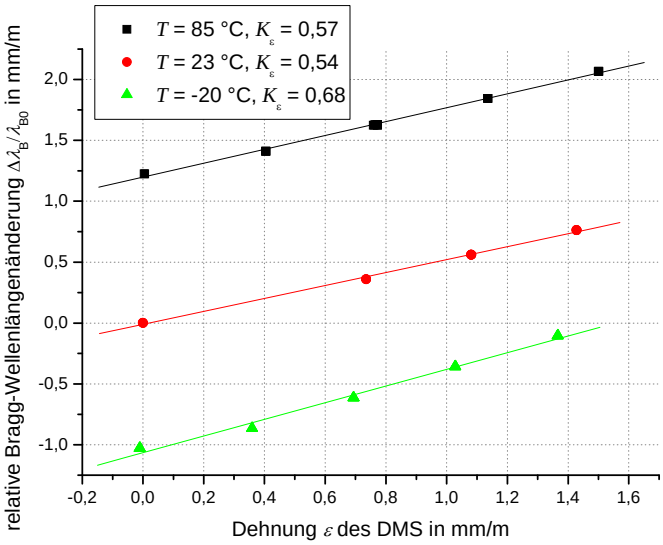


Abb. 29: FBG mit Acrylat-Coating mittels Loctite 147 appliziert. Bei T = -20 °C ist ein deutlicher Anstieg des Dehnungsübertragungskoeffizienten zu erkennen.

Der Klebstoff Loctite 147 verhält sich bei niedrigen Temperaturen spröder. Eine solche Veränderung der Klebstoffeigenschaften ist für eine Quantifizierung des Dehnungsübertragungskoeffizienten sehr schlecht. Wünschenswert ist ein Klebstoff, der sich über den geforderten Temperaturbereich chemisch nicht verändert und somit konstante mechanische Eigenschaften aufweist, so dass der Dehnungsübertragungskoeffizient sich nicht ändert.

Kombination von Temperatur- und Lasteinfluss

Zur Beschreibung des Verhaltens von Klebstoff und Coating bei mechanischer Beanspruchung der Probe und gleichzeitiger Temperatureinwirkung können Kalibrierdiagramme aufgestellt werden. Exemplarisch ist in Abb. 30 ein solches Kalibrierdiagramm für einen FBG-Dehnungssensor mit Ormocer®-Coating dargestellt, der mit dem Klebstoff Loctite 147 auf Aluminium appliziert wurde.

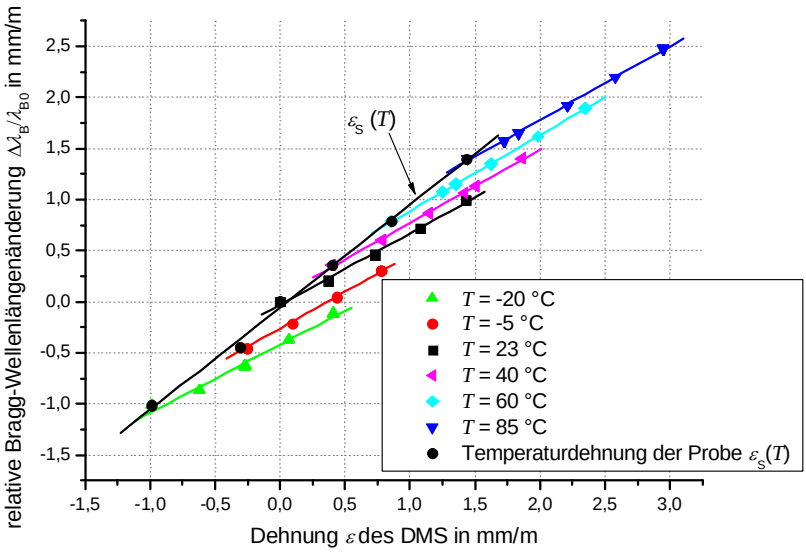

relative Bragg-Wellenlängenänderung $\Delta\lambda_B/\lambda_{B0}$ in mm/m
Dehnung ε des DMS in mm/m
$\varepsilon_S(T)$
T = -20 °C
T = -5 °C
T = 23 °C
T = 40 °C
T = 60 °C
T = 85 °C
Temperaturdehnung der Probe $\varepsilon_S(T)$

Abb. 30: Kalibrierdiagramm eines mit Ormocer® gecoateten FBG. Dargestellt ist die Änderung der Bragg-Wellenlänge über der Dehnungsänderung des DMS. Es ist die Abhängigkeit der Grund-Bragg-Wellenlänge von der scheinbaren Dehnung ε_S des Messobjekts bedingt durch die Temperatur zu erkennen.

Mit einem solchen Kalibrierdiagramm kann die scheinbare Dehnung ε_S des Messobjekts, die durch eine Änderung der Temperatur ohne Einwirkung einer äußeren mechanischen Beanspruchung auftritt, durch die Verschiebung der Grund-Bragg-Wellenlänge (bezogen auf 23 °C) bestimmt werden. Die in Abb. 30 schwarz dargestellte Kurve $\varepsilon_S(T)$ errechnet sich aus der Dehnung des DMS bezogen auf die Temperaturänderung ohne mechanische Belastung des Messobjekts und stellt die Wärmeausdehnung der Aluminiumprobe dar. Deutlich ist in Abb. 30 zu erkennen, dass sowohl die Dehnungsänderung des DMS als auch die Änderung der Bragg-Wellenlänge mit der scheinbaren Dehnung ε_S der Aluminiumprobe übereinstimmen.

Im Kalibrierdiagramm sind die vier Belastungsstufen der Probe bis zu einer Dehnung von 1,4 mm/m bei jeder Temperaturstufe zu erkennen. Es wird deutlich, dass die Steigung, also der Dehnungsübertragungskoeffizient, der Belastungskurve für die verschiedenen Temperaturstufen unterschiedlich ist. Bei niedrigen Temperaturen (z. B. -20 °C) ist die Steigung größer und somit auch der Dehnungsübertragungskoeffizient höher. Dieses Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass sowohl der Klebstoff als auch in gewissem Maße das Coating mit sinkender Temperatur spröder werden und somit die Dehnung vom Messobjekt auf den FBG-Sensor besser übertragen wird. Für diesen Klebstoff werden mit zunehmender Temperatur die Kurven geringfügig flacher, was eine Verringerung des Dehnungsübertragungskoeffizienten aufgrund einer möglichen Klebstofferweichung bedeutet. Dieses Verhalten ist umso ausgeprägter, je unvoll-

ständiger der genutzte Klebstoff bei Durchführung der Untersuchungen ausgehärtet ist. Im Anhang, Kapitel A.1.1, sind für die verschiedenen Coatings die Dehnungsübertragungskoeffizienten mit dem Klebstoff Loctite 147 bei den einzelnen Temperaturstufen dargestellt.

Mathematisch lässt sich die scheinbare Dehnung des Messobjekts aufgrund einer Temperaturänderung ohne mechanische Belastung als Änderung der Bezugs-Bragg-Wellenlänge beschreiben:

$$\frac{\lambda_B - \lambda_{B0}}{\lambda_{B0}} \cdot K_\varepsilon = \varepsilon_S \tag{51}$$

Wirkt zusätzlich eine mechanische Belastung bei konstanter Temperatur auf das Messobjekt, so lässt sich diese durch die Bragg-Wellenlänge skaliert mit dem Dehnungsübertragungskoeffizienten beschreiben:

$$\lambda_B \cdot K_\varepsilon = \varepsilon_M \tag{52}$$

Der Dehnungsübertragungskoeffizient K_ε ist dabei genau dann von Klebstoff und Coating abhängig, wenn sich die mechanischen Eigenschaften von Klebstoff und Coating mit der Temperatur ändern. Dies ist in Abb. 30, dem hier angeführten Beispiel, der Fall. Bei dem hier genutzten Klebstoff in Kombination mit diesem Coating erfolgt eine Änderung des Dehnungsübertragungskoeffizienten über den gesamten Temperaturbereich. Für eine Anwendung dieses Klebstoffs zur Applizierung und Nutzung von FBG-Dehnungssensoren in diesem Temperaturbereich (laut Herstellerangaben ist dieser Klebstoff für diesen Temperaturbereich ausgelegt!) ist daher die Bestimmung der Änderung des Dehnungsübertragungskoeffizienten mit der Temperatur durch Kalibrierdiagramme von wesentlicher Bedeutung, um die mechanische Dehnung des Messobjekts genau bestimmen zu können. Prinzipiell ist für eine messtechnische Anwendung genau derjenige Klebstoff geeignet, bei dem in den experimentell ermittelten Kalibrierdiagrammen keine Änderung der Kurvensteigung für den gesamten Temperaturbereich auftritt. Die Notwendigkeit der Kalibrierdiagramme liegt in der experimentellen Bestimmung desjenigen Klebstoffs in Kombination mit einem Coating, bei dem der Dehnungsübertragungskoeffizient unabhängig von der Temperatur ist. Im Anhang (siehe Kapitel A.1) sind in Tabellen für alle hier verwendeten Klebstoffe in Kombination mit verschiedenen Coatings im Dehnungsbereich von 0 bis 1,4 mm/m der Proben bei gleichzeitiger Temperaturänderung die ermittelten Dehnungsübertragungskoeffizienten aufgeführt. Allein die Bestimmung eines geeigneten Klebstoffs für eine optimale Dehnungsübertragung unter den genannten Temperaturbedingungen hätte den gesamten Zeitraum dieser Arbeit in Anspruch genommen. Nach Meinung der Autorin ist die gezielte Entwicklung eines angepassten Klebstoffs für FBG-Dehnungssensoren unvermeidbar und von grundlegender Bedeutung für die messtechnische Anwendung dieser Sensorik.

Die Wiederholbarkeit der Messergebnisse der durchgeführten Versuche konnte für alle Klebstoff-Coating-Kombinationen durch eine repräsentative Anzahl von Prüfzyklen (zwischen sechs und zehn) bei den jeweiligen Temperaturstufen gezeigt werden. In Abb. 31 sind exemplarisch die Ausgleichsgerade durch die ermittelten Messwerte und die dazu gehörigen Abweichungen der Messwerte eines FBG-Dehnungssensors mit Ormocer®-Coating für sechs Prüfzyklen bei 23 °C dargestellt.

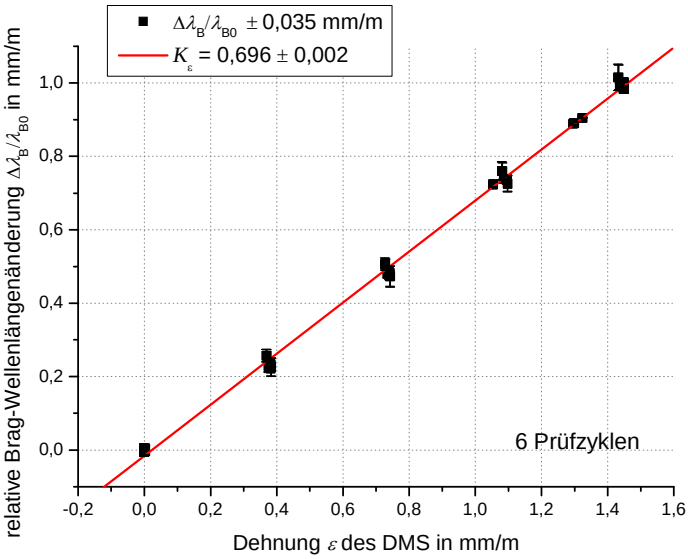


Abb. 31: Ausgleichsgerade durch die Messwerte aus 6 Prüfzyklen bei 23 °C für einen FBG-Dehnungssensor mit Ormocer®-Coating, der mit Loctite 147 appliziert wurde.

Die ermittelten Messunsicherheiten in der aus der Wellenlänge bestimmten Dehnung liegen für alle Klebstoff-Coating-Kombinationen insgesamt sehr nah beieinander. Es konnten keine Ergebnisse mit einer Messunsicherheit kleiner als 35 µm/m erzielt werden. Die maximale Messunsicherheit liegt bei 50 µm/m.

Einfluss der Klebungsart (punktuell/vollflächig)

Im Vergleich zu den vollflächig verklebten FBG-Dehnungssensoren kann die Klebung auch punktuell links und rechts vom FBG ausgeführt werden. Ein Vergleich bei 23 °C zwischen den Messergebnissen von gleichartig gecoateten FBG (Acrylat), die mit dem selben Klebstoff (Loctite 147) punktuell bzw. vollflächig verklebt wurden, ist in Abb. 32 dargestellt.

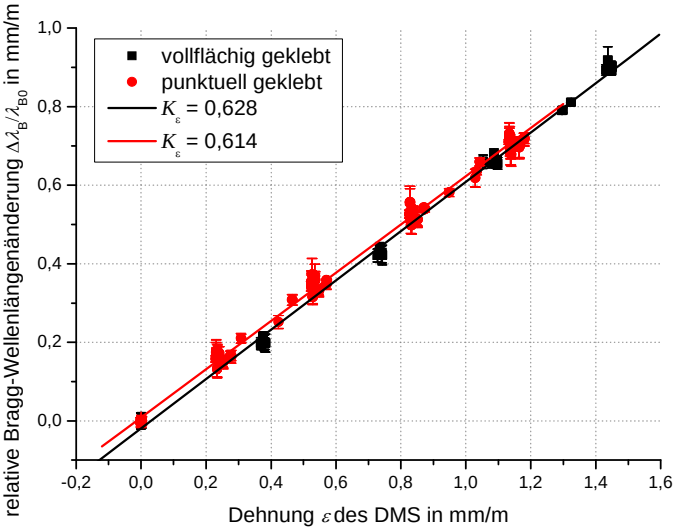


Abb. 32: FBG-Dehnungssensoren mit Acrylat-Coating appliziert auf Aluminium mit Loctite 147. Schwarz: Vollflächige Verklebung des FBG, Rot: Punktuell links und rechts vom FBG verklebt.

Wie auch in Abb. 32 zu erkennen ist, unterscheiden sich punktuell und vollflächig verklebte FBG-Dehnungssensoren in ihrem Dehnungsübertragungskoeffizienten kaum, wenn sie korrekt appliziert worden sind. Bei punktueller Klebung kann es durch falsche Applizierung dazu kommen, dass nicht sofort die Verformung des Messobjekts gemessen wird, da zunächst erst das punktuell applizierte FBG gespannt werden muss. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Art der Verklebung (punktuell oder vollflächig) und der Größenordnung des Dehnungsübertragungskoeffizienten konnte bei den hier durchgeführten Versuchen nicht festgestellt werden. Zur Bestimmung des Dehnungsübertragungskoeffizienten müssen nach Auswahl von Coating und Klebstoff bei den punktuellen wie auch den vollflächigen Verklebungen Kalibrierdiagramme ermittelt werden.

Die Messunsicherheiten der zu ermittelnden Dehnungen aus der Bragg-Wellenlänge liegen, wie auch bei den Klebstoff-Coating-Kombinationen vollflächig verklebter Sensoren, im Bereich von 35 µm/m bis 50 µm/m. Beispielhaft ist die Ausgleichsfunktion eines FBG-Sensors mit Acrylat-Coating, der punktuell mit Loctite 147 verklebt wurde, über acht Prüfzyklen bei 23 °C in Abb. 32 als rote Kurve dargestellt. Die Messunsicherheit dieser Klebstoff-Coating-Kombination, punktuell verklebt, beträgt 40 µm/m. Alle ermittelten Dehnungsübertragungskoeffizienten der Klebstoff-Coating-Kombinationen bei punktueller Klebung sind im Anhang, Kapitel A.1.2, für die einzelnen Temperaturbereiche zusammengefasst.

Durch diese Untersuchungen konnten die auf die Dehnungsübertragung Einfluss nehmenden Parameter charakterisiert werden. Als Referenzverfahren wurden zunächst herkömmliche elektrische Dehnungsmessstreifen genutzt. Der Dehnungsübertragungskoeffizient wird daher maßgeblich beeinflusst durch:

- Coating
- Klebstoff
- Temperatur in Kombination mit statischer Belastung

Aufgrund der schon zuvor diskutierten Eigenschaften von DMS (Kapitel I.2.1) ist die Auswahl eines anderen Referenzverfahrens, das direkt an der Messstelle der FBG-Dehnungssensoren gleichzeitig messen kann, gerade für die Charakterisierung von Werkstoffen mit neuartigen Eigenschaften von großer Bedeutung. Auf das Referenzverfahren wird in Abschnitt III eingegangen.

II.5 Relative Feuchte

Verschiedene auf Aluminium-Proben applizierte FBG-Sensoren wurden Feuchtezyklen mit einer relativen Luftfeuchte von 40 %, 60 % und 90 % bei 30 °C unterworfen. Es konnte bei den applizierten Sensoren eine Verschiebung der Bezugs-Bragg-Wellenlänge festgestellt werden. Um diese Effekte genauer zu untersuchen, wurden zunächst FBG-Dehnungssensoren mit Ormocer®- und Acrylat-Coating sowie entcoatete FBG im unapplizierten Zustand diesen Feuchtezyklen ausgesetzt. Damit konnte qualifiziert werden, ob nicht nur der Klebstoff Feuchtigkeit aufnimmt, sondern auch das Coating. Für das FBG mit Ormocer®-Coating wurde eine deutliche Änderung der Bragg-Wellenlänge von bis zu 60 pm bei 90 % Luftfeuchte festgestellt. Für FBG-Dehnungssensoren mit Acrylat- bzw. ohne Coating konnten diese Effekte nicht festgestellt werden. Insgesamt wurden 12 FBG-Dehnungssensoren mit Ormocer®-Coating, die in einer einzigen optischen Faser eingeschrieben wurden, mehreren Feuchtezyklen ausgesetzt. In Abb. 33 ist die Abhängigkeit der Wellenlängenänderung von der Feuchte für die 12 untersuchten FBG-Sensoren zu erkennen.

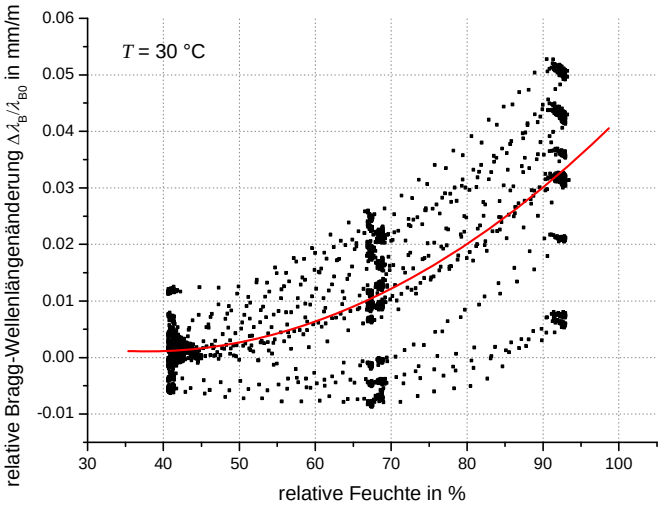


Abb. 33: Änderung der Wellenlänge von Ormocer® gecoateten FBG-Sensoren bei Änderung der relativen Luftfeuchte.

Eine eindeutige Änderung der Bragg-Wellenlänge bei variierender Feuchte ist in Abb. 33 nicht zu erkennen, lediglich die Tendenz zu höheren Wellenlängen bei erhöhter Feuchte. Die Abweichung in der Bragg-Wellenlänge von einem polynomialen Ausgleichsfit 2. Ordnung liegt bei ± 0,029 mm/m. Es wird vermutet, dass die Wassermoleküle bei erhöhter Feuchte in die Polymerketten des Ormocer® eindringen und somit zu einem Quellen des Coatings führen. Dieser

Prozess scheint in gewissem Maße reversibel zu sein. Allerdings reagieren die einzelnen Sensoren unterschiedlich stark empfindlich auf die Feuchteänderung, obwohl diese in dieselbe Faser eingeschrieben wurden.

Um den Einfluss von Feuchtigkeit auf den Dehnungsübertragungskoeffizienten möglichst gering zu halten, bietet es sich im einfachsten Fall an, die Messstellen einschließlich der FBG-Dehnungssensoren durch eine angebrachte Abdeckung vor Feuchtigkeit zu schützen. Die Quantifizierung des Feuchteeinflusses auf die Dehnungsübertragung, sowohl in Bezug auf das Coating als auch den Klebstoff, bedarf jedoch weiterführender Untersuchungen. Wird der Einfluss von Feuchtigkeit bei Messungen mit FBG-Dehnungssensoren nicht beachtet, so kommt es unter Umständen zu signifikanten Messfehlern.

In weiterführenden Untersuchungen muss die Änderung der mechanischen Parameter von Ormocer® gecoateten FBG-Sensoren mit der Feuchte analysiert werden. Als nächster Schritt muss untersucht werden, inwieweit sich die mechanische Belastbarkeit der eingesetzten Klebstoffe durch Feuchtigkeit ändern. Diese Untersuchungen können weiterführend im Rahmen des neuen Validierungsmessplatzes in der BAM (Abschnitt III) und in Kombination mit Klimakammern für die Feuchtezyklen durchgeführt werden.

III Validierungsmessplatz KALFOS

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung einer Messmethodik zur Charakterisierung des Dehnungsübertragungsverhaltens von oberflächenapplizierten FBG-Sensoren beschrieben. Es wurde ein physikalisch unabhängiges Referenzverfahren zur Ermittlung der Dehnung des Messobjekts im Vergleich zur Wellenlängenänderung der FBG-Sensoren ausgewählt. Mit diesem Referenzverfahren wurde, aufbauend auf die in Abschnitt II experimentell ermittelten Einflussparameter, ein Messplatz konzipiert, mit dem das Dehnungsübertragungsverhalten zuverlässig und mit hinreichender Genauigkeit ermittelt werden kann. Dieser Messplatz, im weiteren als KALFOS (Kalibrierung faseroptischer Sensoren) bezeichnet, musste zunächst charakterisiert werden, bevor dieser zur Validierung von oberflächenapplizierten FBG-Sensoren eingesetzt werden kann.

III.1 Konzipierung und Entwicklung eines Prüfverfahrens

Als Ergebnis der in Abschnitt II, Kapitel 4 bis 8 gewonnenen Erkenntnisse werden in diesem Kapitel die Anforderungen an den Messplatz und das Referenzverfahren dargelegt. Die Messmethodik und die zugehörige Datenverarbeitung werden erläutert.

III.1.1 Messmethodik und Auswahl des Referenzverfahrens

Die hier gewählte Messmethode, mit der die Dehnungsübertragung vom Messobjekt auf den Dehnungssensor bestimmt werden soll, besteht aus einer Prüfeinrichtung, mit der gezielte und kombinierte Belastungs- und Temperaturbeanspruchungen auf das Messobjekt aufgebracht werden können, sowie einem messtechnologisch unabhängigen Referenzverfahren zur Ermittlung der aufgebrachten Beanspruchungen. Für unterschiedliche Beanspruchungszustände der Probe wird das Antwortsignal des FBG-Dehnungssensors mit den ermittelten Dehnungsmesswerten des Referenzverfahrens verglichen und der Dehnungsübertragungskoeffizient aus diesem Verhältnis berechnet. Das Referenzverfahren muss die Dehnung des Messobjekts und gleichzeitig auch die Dehnung des FBG-Sensors erfassen und diese Messergebnisse miteinander und mit den Messergebnissen der FBG-Sensoren korrelieren können.

DMS wurden in Abschnitt II, Kapitel 7 zur Referenzierung der FBG-Sensoren herangezogen. Diese haben jedoch den entscheidenden Nachteil, dass sie meist auf die Rückseite der Proben oder neben den FBG-Sensoren appliziert werden müssen und somit nicht exakt den Dehnungszustand der FBG-Sensoren an der Messstelle ermitteln können. Zudem sind die DMS, wie schon zuvor erwähnt, zur Ermittlung von sehr hohen Dehnungen auf bestimmten Werkstoffen wegen ihres begrenzten Dehnungsbereichs nicht geeignet. Eine differenzierte Be-

urteilung der durch den Klebstoff aufgenommenen Dehnung im Vergleich zur auf den FBG-Sensor übertragenen Dehnung und der Dehnung des Messobjekts ist mit DMS nicht möglich.

Mechanische Extensometer können dagegen auch bei größeren Dehnungen eingesetzt werden. Allerdings liegt die Problematik von mechanischen Extensometern in der korrekten Befestigung der Extensometer. Diese können aufgrund der empfindlichen Sensorik, die oft auf beiden Seiten der Proben aufgebracht ist, nur auf der schmalen Seite der Probekörper angebracht werden. Aufgrund der Spannfedern kommt es zum Kippen des Extensometers auf der schmalen Probenseite. Eine sichere Anbringung ist oft nicht möglich und schließt somit eine Verwendung dieses Messprinzips zur Referenzierung aus.

Zur Beurteilung der Haftung und der Klebstoffgeometrie sind zuvor Gefügeschliffe hergestellt worden. Diese bieten zwar die Möglichkeit, die Klebstoffgeometrie genau auszumessen, führen jedoch zur vollständigen Zerstörung der Proben und der darauf applizierten teuren Sensorik.

Aus diesen Gründen fiel die Wahl eines Referenzverfahrens auf ein optisches System. Zunächst wurden mit einem 3D-Stereokorrelationsverfahren Versuche zur Bestimmung der Dehnung von Probekörper, Klebstoff und appliziertem FBG-Dehnungssensor durchgeführt. Diese wurden mit den gemessenen Dehnungen der DMS verglichen und bewertet (Kapitel III.1.1.2).

III.1.1.1 Dehnungsmessung mit 3D-Stereokorrelation als Referenz

Das hier eingesetzte 3D-Stereokorrelationsverfahren ist das ARAMIS-System der Firma GOM - Gesellschaft für optische Messtechnik mbH. Es ist ein berührungslos arbeitendes 3D-Verformungsmesssystem und besteht aus zwei Kameras, die in einem bestimmten Winkel zueinander angeordnet ein definiertes Messfeld auf dem Probekörper betrachten. Das Messfeld wird hierfür als ein fleckenartiges schwarz-weißes Muster aus Lack aufgesprüht und für das Kamerasystem vermessbar. Zunächst wird ein Referenzbild aufgenommen. Die Oberflächenstruktur des Messobjekts wird dabei in Facetten einer bestimmten definierbaren Pixelgröße unterteilt. Eine Facette ist ein Feld bestehend aus einer Anzahl von Pixeln, wobei die Matrix der Pixel-Grauwerte eine eindeutige Identifikation jeder Facette darstellt. Diesen Facetten werden dann 3D-Koordinaten in einer Tangentialebene zur Oberfläche des Messobjekts zugeordnet. Durch einen digitalen Bildkorrelationsalgorithmus werden die Matrizen der Pixelgrauwerte der einzelnen Facetten im Referenzbild mit den Facetten im Bild des unter Belastung verformten Bauteils korreliert, so dass daraus für die 3D-Koordinaten der Facetten die horizontalen und vertikalen Verschiebungen errechnet werden können. Zur Bestimmung der Dehnung wird dann für eine Facette in Relation zu ihren acht benachbarten Facetten (sog. 3 x 3 Facettenfeld) aus

den Verschiebungen die Dehnung in der jeweiligen Tangentialebene der Facette berechnet. So können dann aus den Verformungen des Messobjekts im Vergleich zum Referenzzustand Dehnungen errechnet werden [Ara09]. Mit diesem Verfahren sind je nach verfügbaren Kameras sowohl statische als auch dynamische Belastungsmessungen möglich.

Vor jeder Messung muss eine Kalibrierung des Systems durchgeführt werden. Dafür gibt es spezielle Kalibrierscheiben, auf denen von den Kameras bestimmte Punkte erkannt werden müssen. Mit der Kalibrierung wird die Konfiguration des Referenzverfahrens festgelegt, d. h., der Abstand der Kameras, die Orientierung der Kameras zueinander sowie die Abbildungseigenschaften der Objektive (Fokus, Brennweite, Verzeichnung). Alle diese Parameter werden in der Software zur Berechnung der Koordinaten des Kalibrierkörpers genutzt und auf das Messobjekt zurückgerechnet. Wird eine Kalibrierung nicht korrekt durchgeführt oder werden einige Punkte nicht erkannt, so kann keine korrekte Berechnung der Koordinaten der Punkte und der daraus resultierenden Verschiebungen erfolgen.

Für einige Proben aus Kapitel II.7 sind die Zugversuche bei Raumtemperatur (23 °C) wiederholt worden. Zusätzlich zu den DMS wurde die 3D-Stereokorrelation als Referenzmessverfahren eingesetzt. Somit ist auch ein Abgleich zwischen der gemessenen Dehnung des DMS und den ermittelten Dehnungen durch die 3D-Stereokorrelation möglich. Der Vorteil der 3D-Stereokorrelation besteht in der optischen Darstellung der Dehnungen und Verschiebungsfelder des Messobjekts, des Klebstoffs und der Faser, so dass Relativbewegungen zwischen Sensor und Messobjekt detektiert werden können.

In Abb. 34 sind für ein mit Loctite 147 auf Aluminium appliziertes, entcoatetes FBG, die ermittelten Dehnungen des FBG (sowohl aus der FBG-Messung als auch durch 3D-Stereokorrelation) und des Messobjekts (ermittelt mit 3D-Stereokorrelation) im Vergleich zu den Dehnungen des DMS dargestellt. Die Messdaten aus der 3D-Stereokorrelation im Vergleich zur Dehnung des FBG und des Messobjekts sind jeweils mit einer Ausgleichsgeraden gefittet worden. Die im Vergleich zu den Messdaten des DMS oder des FBG stark streuenden Messdaten der 3D-Stereokorrelation sind auf das große Koordinatenrauschen dieser Messtechnik zurückzuführen. Um das Rauschen zu minimieren, werden innerhalb des eingesetzten digitalen Bildkorrelationsalgorithmus Mittelungen durchgeführt. Dabei wird ein Facettenfeld definiert (z. B. für die optische Faser 0,1 mm x 18 mm und für das Messobjekt 1 mm x 18 mm), bei dem aus den Dehnungswerten jeder einzelnen Facette ein Dehnungs-Mittelwert des Facettenfeldes errechnet wird.

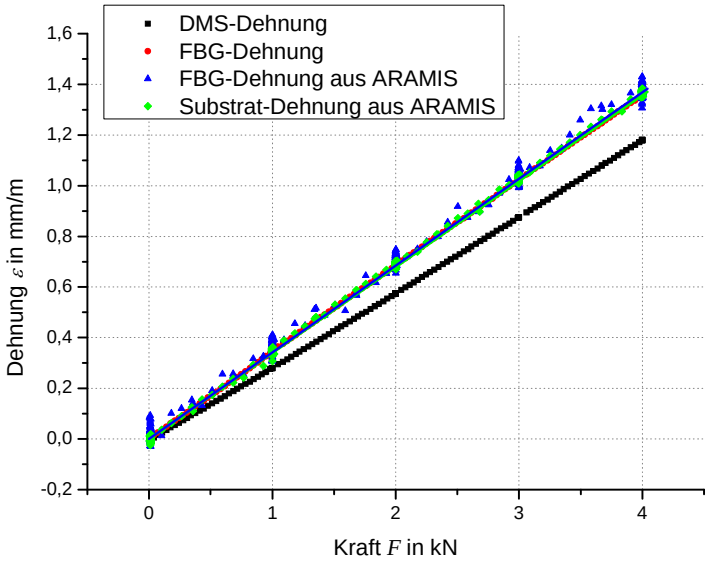


Abb. 34: Darstellung und Vergleich der gemittelten Dehnungen aus dem Messsignal des FBG-Dehnungssensors, dem DMS und der 3D-Stereokorrelation, bei dem die Dehnung des Messobjekts (Substrat) und der Oberfläche der Glasfaser gemessen worden ist.

Deutlich ist zu erkennen, dass die Dehnung des FBG sehr gut mit der Dehnung des Messobjekts und den ermittelten Dehnungen aus der 3D-Stereokorrelation korreliert. Der DMS hingegen hat an der Rückseite der Probe eine geringere Dehnung erfasst. Es kann hiermit gezeigt werden, dass bei Referenzierung mit DMS dieser durch mögliche Applizierungsunsicherheiten ebenso falsche Messwerte liefern kann wie auch ein fehlerhaft applizierter FBG-Sensor. Dies ist beim Vergleich zwischen den Ausgleichsgeraden des DMS und der Dehnung des Messobjekts aus der 3D-Stereokorrelation in Bezug auf das FBG in Abb. 35 zu erkennen.

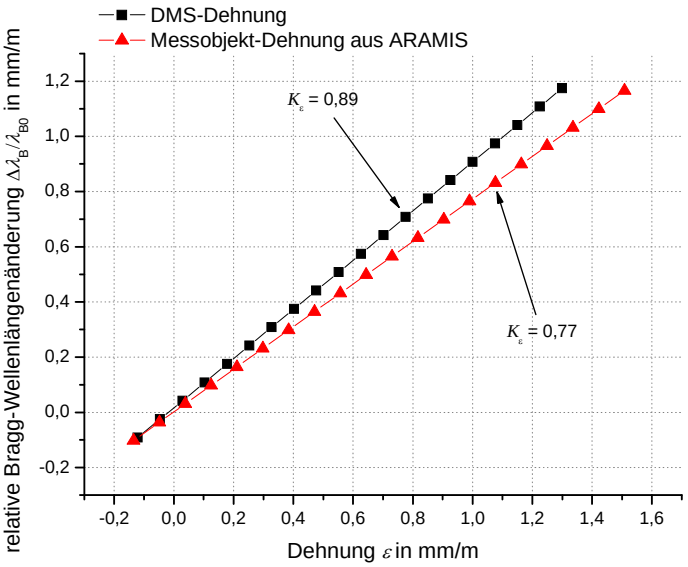


Abb. 35: Bestimmung des Dehnungsübertragungskoeffizienten bei Bezug der Wellenlängenänderung des FBG-Dehnungssensors (aus Abb. 34, entcoatetes FBG appliziert mit Loctite 147) auf die Dehnung des DMS und auf die Dehnung des Messobjekts. Dargestellt sind die Ausgleichsgeraden der Messwerte nach Ermittlung mit der 3D-Stereokorrelation .

Der Dehnungsübertragungskoeffizient zwischen der Bragg-Wellenlängenänderung und der Messobjekt-Dehnung aus der 3D-Stereokorrelation beträgt 0,77 und bestätigt somit eine gute Dehnungsübertragung. Der Vergleich der Bragg-Wellenlängenänderung mit der Dehnung des DMS erzeugt einen Dehnungsübertragungskoeffizienten von 0,89. Dieser Wert ist stark fehlerbehaftet, da die in diesem Fall schlechte Dehnungserfassung des DMS keine gute Abbildung der wahren Dehnungen des Messobjekts darstellt. Benutzt ein Anwender einen DMS, der ohne seine Kenntnis einen nicht akzeptablen Messfehler erzeugt, als Referenz, dann würde dieser einen falschen Dehnungsübertragungskoeffizienten für den FBG-Dehnungssensor ermitteln und dementsprechend falsche Messwerte erhalten. Dieses Beispiel macht deutlich, dass nur eine unabhängige Bestimmung der Dehnung über ein größeres Messfeld direkt an der Messstelle des FBG-Dehnungssensors eine zuverlässige Referenz liefert.

Mit der 3D-Stereokorrelation können die Dehnungen in den einzelnen Segmenten (Messobjekt, Klebstoff, optische Faser) ermittelt werden. Damit wird eine optische Beurteilung der Dehnungen in diesen drei unterschiedlichen Materialbereichen möglich. In Abb. 36 ist dargestellt, wie sich die mittleren Dehnungen des Messobjekts (Aluminium), des Klebstoffs (Loctite 147) und der optischer Faser (mit Acrylat-Coating) in den einzelnen Belastungsstufen verhalten. Dabei wurde das Messobjekt in Stufen von 1 kN belastet. Die Stufen wurden jeweils eine

halbe Stunde lang gehalten. Nach einer maximalen Belastung von 4 kN wurde das Messobjekt entlastet.

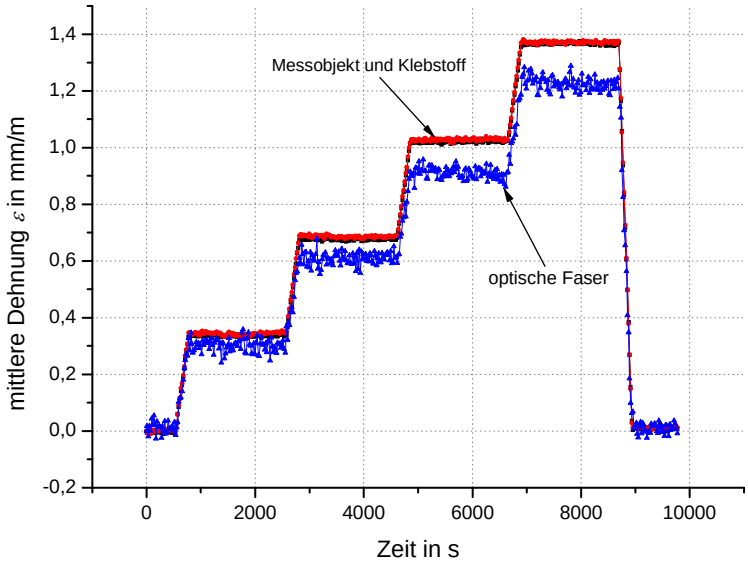


Abb. 36: Darstellung der mit der 3D-Stereokorrelation ermittelten mittleren Dehnungen des Messobjekts, des Klebstoffs Loctite 147 und der optischen Faser für unterschiedliche Belastungsstufen. Es ist zu erkennen, dass die optische Faser bei erhöhter Belastung eine geringere Dehnung erfährt.

Für die auf das Messobjekt aufgebrachte höchste Belastung (4 kN bzw. 1400 µm/m) ist in Abb. 37 die Falschfarbendarstellung des Messobjekts aus Abb. 36 dargestellt. Die Lage der optischen Faser ist zwischen den gestrichelten Linien markiert. In dieser Darstellung ist zu erkennen (rot eingekreist), dass die Dehnung der optischen Faser im Verhältnis zur Dehnung des Messobjekts und des Klebstoffs bei höherer Belastung geringer ist. Die Faser widersetzt sich der Dehnung des Klebstoffs und des Messobjekts. In Abb. 36 wird in der Darstellung der Dehnungsstufen bei höheren Belastungen ebenfalls deutlich, dass die optische Faser die Dehnung des Messobjekts und des Klebstoffs nicht erreicht. Dieser Klebstoff verhält sich also bei höheren Dehnungen gummiartig und überträgt die Dehnungen daher nur unzureichend auf die optische Faser.

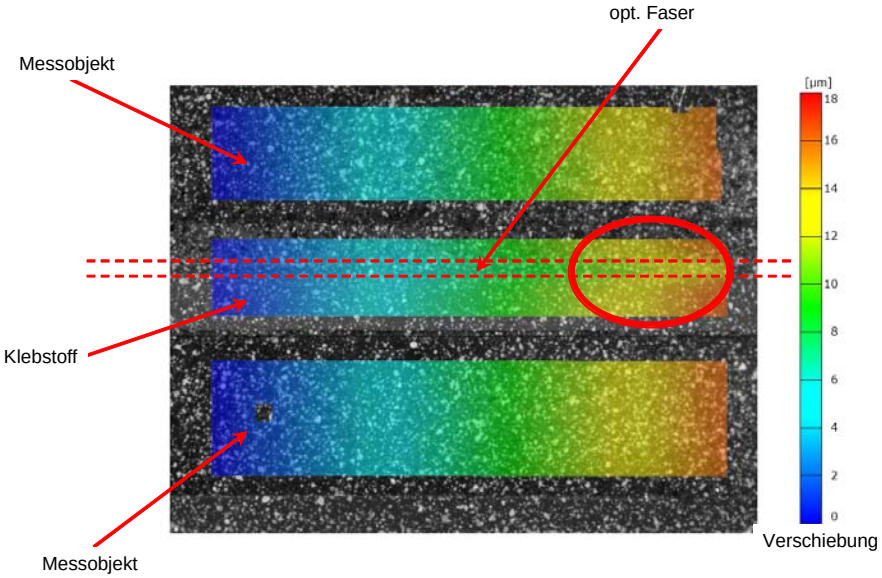


Abb. 37: Falschfarbendarstellung der Verschiebungen in der opt. Faser, im Klebstoff und im Messobjekt bei einer Dehnung von 1400 µm/m.

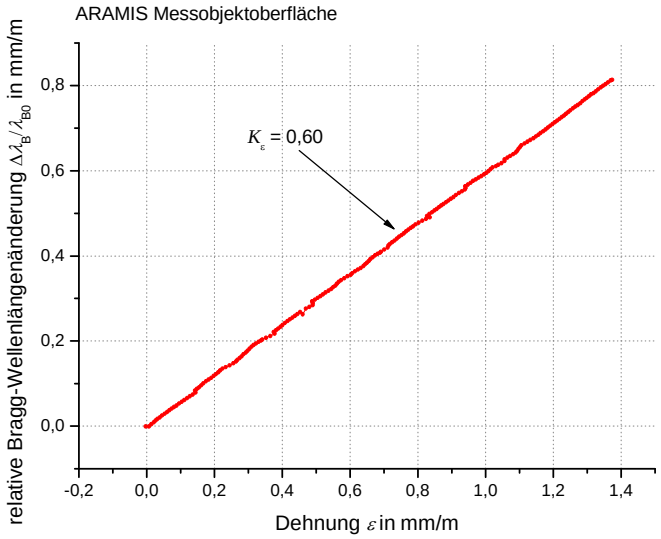


Abb. 38: Bestimmung des Dehnungsübertragungskoeffizienten in Abhängigkeit der Bragg-Wellenlänge von der Dehnung des Messobjekts (also der Aluminiumoberfläche), ermittelt mit der 3D-Stereokorrelation. Der Dehnungsübertragungskoeffizient beträgt 0,60.

Bestimmt man für die Probe aus Abb. 36 und 37 aus der Wellenlängenänderung des FBG-Dehnungssensors in Abhängigkeit von der Dehnung des Messobjekts (ermittelt mit 3D-Stereokorrelation) den Dehnungsübertragungskoeffizienten, so ergibt sich dieser zu K_ε = 0,60, wie in Abb. 38 dargestellt. Dies ist ein sehr niedriger Wert und spiegelt das schlechte Dehnungsübertragungsverhalten dieser Messstelle wieder, was zuvor schon visuell in Falschfarbe (Abb. 37) dargestellt wurde. Im Anhang im Kapitel A.2 sind die Dehnungsübertragungskoeffizienten in Abhängigkeit des DMS und der 3D-Stereokorrelation für die hier untersuchten Proben dargestellt.

Die hier durchgeführten Untersuchungen bei gleichzeitiger Erfassung der Dehnung von Messobjekten mit drei verschiedenen Verfahren (DMS, FBG-Dehnungssensoren und 3D-Stereokorrelation) gestatten auch einen direkten Vergleich zwischen DMS und 3D-Stereokorrelation. In Abb. 39 ist die Dehnung der Messobjektoberfläche gemessen mit der 3D-Stereokorrelation in Abhängigkeit von der Dehnung des DMS aufgetragen worden. Aus der Ausgleichsgeraden ist zu erkennen, dass die mit der 3D-Stereokorrelation gemessene Dehnung an der Stelle des applizierten FBG-Sensors um bis zu 3,5 % höher liegt als die Dehnung des DMS auf der Rückseite des Messobjekts. Diese Abweichung liegt jedoch innerhalb der Messunsicherheiten der beiden Messverfahren und somit korrelieren die ermittelten Dehnungen gut.

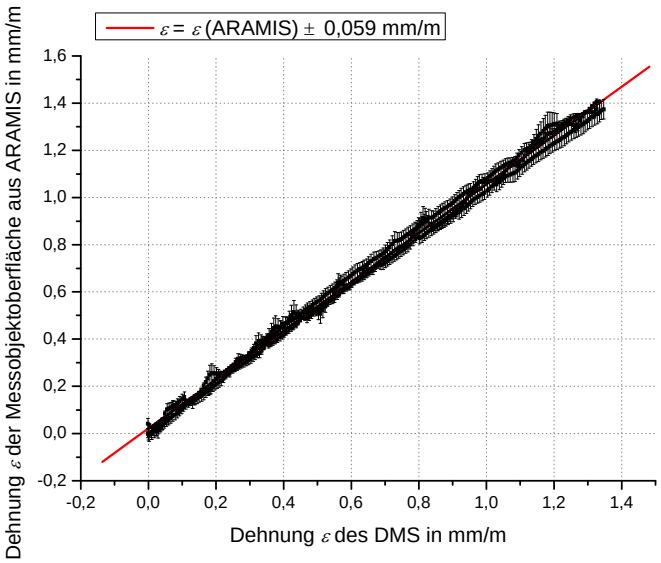


Abb. 39: Vergleich zwischen der Dehnung des DMS und der Dehnung aus der 3D-Stereokorrelation. Die Schwankungen in den Dehnungswerten des 3D-Stereokorrelations-Verfahrens resultieren aus dem starken Koordinatenrauschen.

Die maximale Abweichung der Dehnung der 3D-Stereokorrelation von der in Abb. 39 eingezeichneten roten Ausgleichsgeraden beträgt bei drei durchgeführten Prüfzyklen ±59 µm/m. Diese sichtbaren Schwankungen in der Dehnung sind durch das Koordinatenrauschen der 3D-Stereokorrelation bedingt. Das Rauschen hängt dabei von der hier gewählten Facettengröße ab. Je größer die Facette gewählt wird, desto flacher liegt diese auf der Oberfläche auf und desto genauer kann deren Koordinate bestimmt werden. In diesem Falle mussten sehr kleine Facetten gewählt werden, um die Verschiebung der optischen Faser erfassen zu können, da die optische Faser nur als dünner Streifen aus dem Klebstoff heraus ragt. Dieses Verfahren zur Ermittlung von Verschiebungen bzw. Dehnungen ist daher für wesentlich größere Dehnungen ausgelegt. Bei den hier auftretenden kleinen Dehnungen gelangt das Verfahren an die Auflösungsgrenze.

Die 3D-Stereokorrelation eignet sich sehr gut zur visuellen Darstellung und Bestimmung der Dehnungen in den einzelnen Schichten und Werkstoffen (Messobjekt, Klebstoff, optische Faser) an der Messstelle. Durch die Visualisierung können schnell fehlerhafte Verklebungen und fehlerhafte Referenzsensoren erkannt werden. Die Eignung zu einem messtechnologisch unabhängigen, berührungslosen Qualifizierungsverfahren für FBG-Dehnungssensoren, bei dem gezielt die Dehnung des Messobjekts, des FBG-Sensors und des Klebstoffs an der konkreten Messstelle ermittelt wird, hat dieses Verfahren erfüllt. Im Anhang, Kapitel A.2 sind die mit der 3D-Stereokorrelation ermittelten Dehnungsübertragungskoeffizienten dargestellt.

Der Nachteil dieses Verfahrens ist allerdings die hohe Messunsicherheit. Diese liegt im Bereich von bis zu einigen zehn µm bezogen auf die Verschiebung und ergibt sich aus der Größe der gewählten Facetten, der Genauigkeit, mit der die 3D-Koordinaten der einzelnen Facetten bestimmt werden können, der Anzahl der Mittelungen über die Facetten und der Güte des genutzten Auswertealgorithmus. Für hochpräzise und hochauflösende Messungen, wie sie in einer Validierungseinrichtung für faseroptische Sensoren durchgeführt werden sollen, wird daher ein anderes Verfahren gewählt, das 3D-ESPI-Verfahren.

III.1.1.2 Referenzverfahren 3D-ESPI

Aus den viel versprechenden Versuchen mit der 3D-Stereokorrelation wurde ein 3D-ESPI-System (elektronische Specklemuster-Interferometrie, engl.: electronic speckle pattern interferometry) zur Referenzierung von FBG-Dehnungssensoren ausgewählt. Dieses System arbeitet auf Basis der Speckle-Interferometrie und erzielt bei optimalen Verhältnissen eine extrem hohe Messempfindlichkeit und eine Auflösung von bis zu 30 nm (In-plane), was eine wesentliche Verbesserung in der Auflösung im Vergleich zur 3D-Stereokorrelation darstellt. Sehr kleine Dehnungsbereiche von bis zu 3000 µm/m, in denen die FBG-Dehnungssensoren eingesetzt

werden, können dementsprechend interferometrisch hochauflösend analysiert werden. Mit dem 3D-ESPI-Verfahren kann, wie mit der 3D-Stereokorrelation, eine differenzierte Verformungsmessung und Beurteilung der an der Dehnungsübertragung beteiligten unterschiedlichen Materialbereiche (Messobjekt, Klebstoff und Sensor) durchgeführt werden. Mit dem ESPI-Verfahren ist eine optische und damit anschauliche Ergebnisinterpretation zur Aufdeckung unerwünschter relativer Starrkörperbewegungen des faseroptischen Dehnungssensors zum Messobjekt möglich.

Das ESPI-Verfahren ist ein optisches Messverfahren zur Erfassung von Verschiebungen an Materialoberflächen. Dieses Verfahren gehört, wie auch die 3D-Stereokorrelation, zu den Ganzfeldmethoden der experimentellen Spannungs- und Verformungsanalyse. Im Gegensatz zu DMS, die punktuell bzw. lokal begrenzt Dehnungen erfassen, beziehen sich hier die ermittelten Messgrößen auf einen ausgewählten Bereich der betrachteten Oberfläche, dem Messfeld. Die ESPI nutzt zur Charakterisierung der Oberfläche eines Messobjekts das entstehende Speckle-Muster, wenn die optisch raue Oberfläche mit kohärentem Licht beleuchtet wird. Speckle sind helle und dunkle Tupfer, die sich zu einem charakteristischen, granulierten Muster, dem sogenannten Speckle-Muster, zusammensetzen. Das Speckle-Muster entspricht einer granularen Intensitätsverteilung des reflektierten kohärenten Lichts und entsteht in der Kamera durch Überlagerung vieler Strahlen mit zufälligen Phasen an der diffus reflektierenden Oberfläche des Messobjekts (siehe Abb. 42 A). Wird ein Speckle-Muster des Messobjekts nach mechanischer Belastung mit einem vorher aufgenommenen Referenzbild der Speckle überlagert, so entsteht ein Speckle-Interferogramm (siehe Abb. 42 B) mit Höhenlinien, das eine Aussage über die Geometrie des Messobjekts zulässt und somit Formänderungen und Deformationen messbar macht.

Die ESPI nutzt Speckle-Interferogramme zur Messung von Veränderungen der Messobjektoberfläche. Die Speckle entstehen dabei durch Beleuchtung des Messfeldes mit einem grünen Nd-Yag-Laser der Wellenlänge λ = 532 nm. Um eine 3D-Darstellung zu erhalten, ist es notwendig, das Messobjekt mit drei unterschiedlichen Beleuchtungseinstellungen zu vermessen. Damit können die Empfindlichkeitsvektoren bestimmt werden, aus denen die Gestaltänderung berechnet wird. Zunächst wird eine In-plane-Messung durchgeführt, wie in Abb. 40 dargestellt.

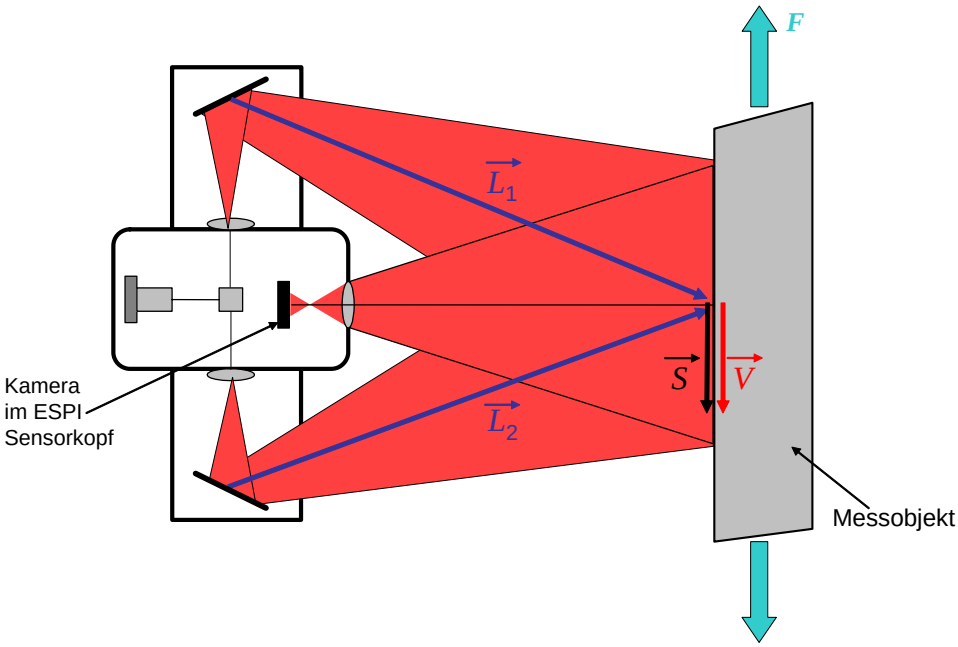


Abb. 40: In-plane Messung mit dem ESPI Verfahren an einem verformten Messobjekt. Der Empfindlichkeitsvektor $\vec{S}$ steht parallel zur Messoberfläche. Der Verschiebungsvektor $\vec{V}$ zeigt in Richtung der Deformation des Messobjekts. Bildquelle: Firma Dantec Dynamics, Inc.

Bei einer In-plane-Messung wird das Messobjekt aus jeweils zwei gegenüberliegenden Beleuchtungsarmen (einmal horizontal und einmal vertikal) beleuchtet. Der Empfindlichkeitsvektor $\vec{S}$ berechnet sich aus den beiden Wellenvektoren $\vec{L}_1$ und $\vec{L}_2$ und steht dabei parallel zur Messobjektoberfläche. Der Verschiebungsvektor $\vec{V}$ zeigt die Richtung der Deformation des Messobjekts an. Eine Phasenänderung im detektierten Licht wird also nur durch den Anteil der Verschiebung parallel zur Messflächennormalen hervorgerufen, was bei Überlagerung mit dem Referenzbild Interferenzstreifen verursacht.

Um die Bewegung out-of-plane, und damit die 3. Dimension, in die Messung einzubeziehen, muss mit einer sogenannten out-of-plane-Beleuchtung gemessen werden. Dabei wird das Messobjekt mit einem Objektstrahl betrachtet, der mit einem internen Referenzstrahl verglichen wird, wie in Abb. 41 dargestellt.

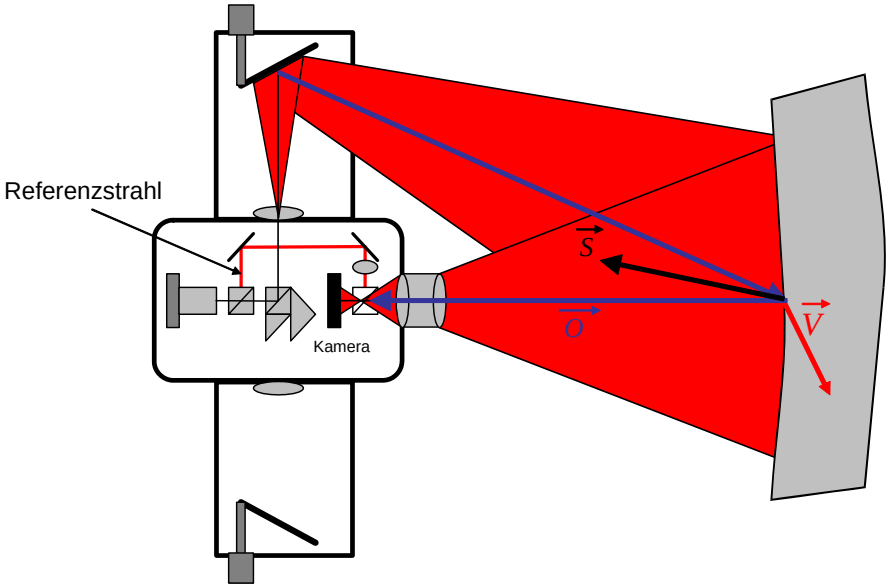
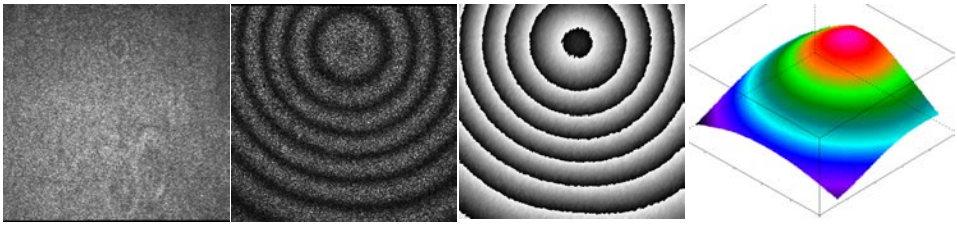


Abb. 41: Out-of-plane Beleuchtung eines Messobjekts. $\vec{O}$ ist die Wellenfront des Objektstrahls, der mit dem internen Referenzstrahl verglichen wird. Der Empfindlichkeitsvektor $\vec{S}$ steht senkrecht auf der Messobjektoberfläche während der Verschiebungsvektor $\vec{V}$ die Richtung der Deformation anzeigt. Bildquelle: Firma Dantec Dynamics, Inc.

Bei der Out-of-plane-Beleuchtung funktioniert das ESPI-Verfahren wie ein Interferometer, bei dem die Phasenverschiebung zwischen einem Objektstrahl und einem Referenzstrahl berechnet wird. Der Empfindlichkeitsvektor steht dabei senkrecht zur Messobjektoberfläche, d. h., nur der Anteil der Verschiebungsänderung in der Messflächenebene führt zu einer Phasenänderung im detektierten Licht.

Bei einer Messung wird zunächst ein Referenzbild aufgenommen. Dafür wird die Oberfläche des Messobjekts aus verschiedenen Raumrichtungen (horizontal und vertikal) nacheinander beleuchtet. Nach Deformation des Messobjekts wird ein weiteres Bild aufgenommen. Durch Subtraktion der beiden Intensitäten des Referenzbildes und des aktuellen Bildes voneinander erhält man eine Phasenverschiebung, die sich in Form von schwarzen Höhenlinien (speckle correlation fringes) im Differenzenbild (Abb. 42 B) ausdrückt. Multipliziert man die Streifenanzahl mit dem Empfindlichkeitsvektor, so erhält man die Größe der Verformung (Abb. 42 C), die in der Dicke und Anzahl der Interferenzstreifen kodiert ist. Zur Berechnung der Verformungsrichtung muss noch eine Phasenschiebe-Technik angewendet werden. Durch korrigierende Maßnahmen zur Rauschreduzierung lässt sich dann eine Aussage über die Gestaltänderung und somit über die Dehnung des Messobjekts treffen (Abb. 42 D). Für das ESPI-Verfahren ist

die Kette der Bildverarbeitung mit ihren Einzelschritten in vereinfachter Form in Abb. 42 dargestellt.



A) Specklebild B) Intensitätsmuster C) Phasenbild D) Verformung

Abb. 42: Darstellung der einzelnen Datenverarbeitungsschritte auf dem Weg von einem Specklemuster zur Berechnung der Verformung eines Messobjekts. Bildquelle: Firma Dantec Dynamics, Inc.

Die zeitliche Dauer eines kompletten Bildeinzugs beträgt 0,75 Sekunden. In dieser Zeit darf sich das Messobjekt nicht bewegen, da die Berechnung der Phasenverschiebung während der Messung durchgeführt wird. Dies stellt extrem erhöhte Anforderungen an die Belastungseinrichtung (siehe Abschnitt III.1.2).

Die Funktionsfähigkeit dieses Referenzverfahrens wurde an Zugproben mit oberflächenapplizierten FBG-Dehnungssensoren gezeigt. Für die in Kapitel III.1.1.1 in Abb. 36 und 37 dargestellte Probe wurde ein Zugversuch durchgeführt, bei dem das ESPI-System als Referenzverfahren eingesetzt wurde.

Mit dem ESPI wurde gezeigt, dass die mittlere Dehnung der optischen Faser wesentlich unterhalb der mittleren Dehnung von Messobjekt und Klebstoff liegt, wie in Abb. 43 quantitativ (weiß eingekreist) und in Abb. 44 qualitativ durch die Ausgleichsgeraden der Messwerte dargestellt. Dies wurde schon in Abb. 37 mit der 3D-Stereokorrelation gezeigt. Der große Vorteil des ESPI-Verfahrens wird in Abb. 43 deutlich: das Messverfahren ist wesentlich empfindlicher als die 3D-Stereokorrelation. Die hier ermittelten Verschiebungen können mit einer Auflösung im nm-Bereich dargestellt werden. Das hier definierte Messfeld hat eine Größe von 3 mm x 3,7 mm, während das Messfeld aus Abb. 37 durch die eingesetzten Objektive und die Entfernung zum Messobjekt eine Größe von 10 mm x 10 mm hatte.

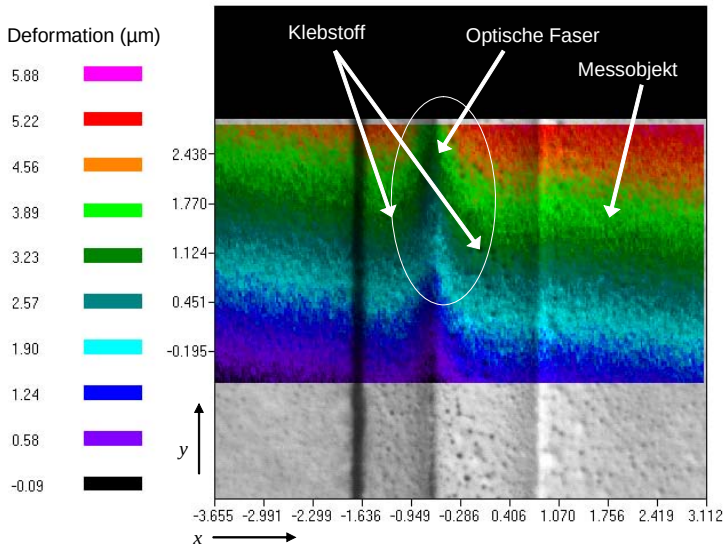


Abb. 43: Auf dem Foto des applizierten FBG-Dehnungssensors ist überlagernd die gemessene Verschiebung bei maximaler Belastung der optischen Faser relativ zum Messobjekt in Falschfarben dargestellt. Am Rand des Bildes sind die Koordinaten des Messfeldes x und y in mm aufgetragen. Die maximale Verschiebung der optischen Faser beträgt 3,89 µm.

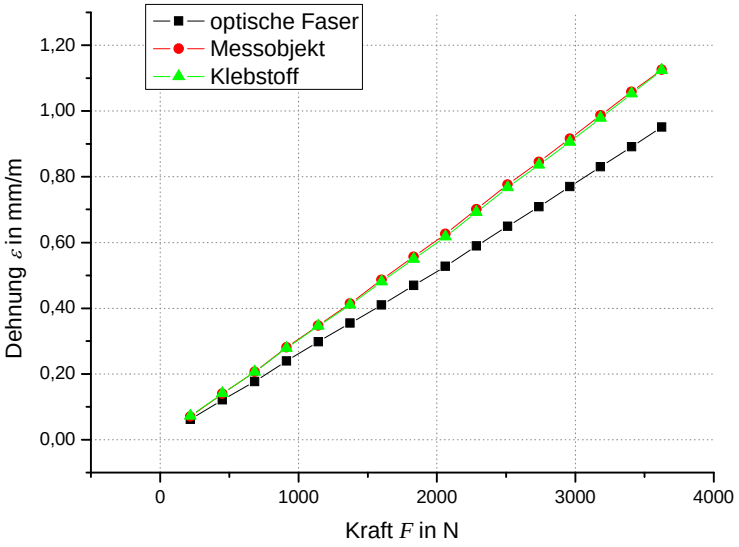


Abb. 44: Ermittelte Dehnung des ESPI-Systems in Bezug auf die auf das Messobjekt aufgebrachte Kraft. Der Klebstoff wird gut vom Messobjekt mitgenommen und erfährt dieselbe Dehnung, während die optische Faser weniger Dehnung erfährt.

Mit dem ESPI-Verfahren kann im Gegensatz zu den herkömmlichen elektrischen Verfahren visuell die relative Bewegung zwischen Messobjekt und Sensor bestimmt werden. In Abb. 45 ist für den hier aufgezeigten Versuch eine Starrkörperkompensation durchgeführt worden.

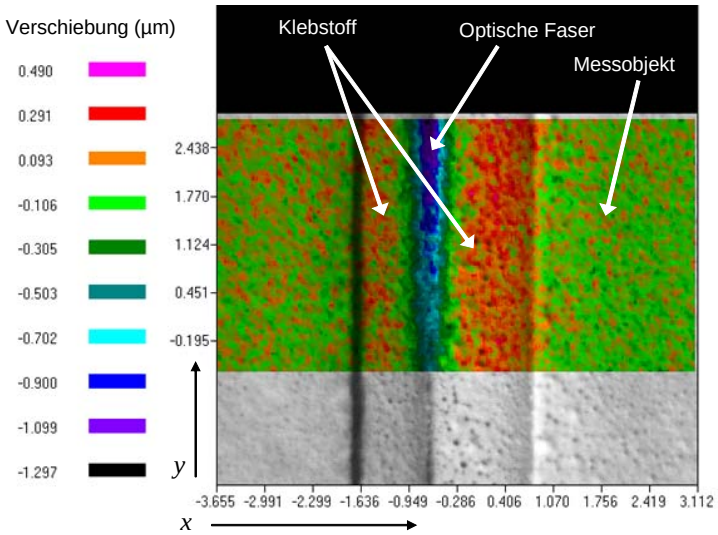


Abb. 45: Falschfarbendarstellung der Relativbewegung von optischer Faser, Klebstoff und Messobjekt. Die Größe des Messfeldes ist in x- und y- Richtung in mm angegeben. Zu erkennen ist, dass die Faser im oberen Messfeldbereich um 1,2 µm weniger Verformung erfährt als das Messobjekt.

Der entscheidende Vorteil des ESPI-Verfahrens ist also, dass relative Bewegungen zwischen Sensor und Messobjekt schon in den Verschiebungen sofort deutlich werden, ohne eine Dehnungsberechnung durchführen zu müssen.

Da für die Validierung und Kalibrierung von oberflächenapplizierten FBG-Dehnungssensoren sehr geringe Dehnungen im Bereich von 1000 µm/m bis 2000 µm/m aufgebracht werden, die mit dem Referenzverfahren erfasst werden müssen, ist das sehr empfindliche ESPI-System aufgrund der höheren Auflösung als Referenzverfahren besser geeignet als die 3D-Stereokorrelation. Die Begründung für den kleinen Dehnungsbereich, mit dem die applizierten Sensoren belastet werden, liegt in der notwendigen Wiederholbarkeit der Messungen mit einem Messobjekt und damit in der Reproduzierbarkeit der Versuche. Die Messobjekte, häufig aus Metall, müssen dabei im elastischen Bereich belastet werden.

III.1.2 Anforderungen an die Prüfeinrichtung

In Abschnitt II konnte gezeigt werden, dass die Dehnungsübertragung vom Messobjekt auf den FBG-Dehnungssensor durch mehrere Parameter (Belastung des Messobjekts, Temperatur, Luftfeuchte) beeinflusst wird. Die Wahl eines geeigneten Referenzierungsverfahrens, um die Dehnungsübertragung vom Messobjekt zum FBG-Dehnungssensor bewerten zu können, fiel auf das 3D-ESPI-Verfahren. Neben dem 3D-ESPI-Verfahren soll jedoch auch die 3D-Stereokorrelation an der Prüfeinrichtung zur Bewertung der Dehnungsübertragung eingesetzt werden.

Die Anforderungen an die Prüfeinrichtung ergeben sich daher aus der Kombination der auf die Dehnungsübertragung Einfluss nehmenden Parameter und den Messbedingungen für das 3D-ESPI-System. Vor allem bei den hochgenauen, flächengestützen Verschiebungs- und Dehnungsmessungen mit dem 3D-ESPI-System muss das Messobjekt während der Bildaufnahme absolut schwingungsfrei sein. Daher wurde hier zur Aufbringung der Dehnungen auf das Messobjekt auch keine Standardzugprüfmaschine ausgewählt, sondern es wurden einige Modifikationen durchgeführt. Eine dynamische Belastungseinrichtung, beispielsweise eine hydraulische Zugprüfmaschine, konnte nicht gewählt werden, da dieses Referenzverfahren für dynamische Messungen nicht geeignet ist. Als Belastungseinrichtung für Messobjekte, auf die FBG-Dehnungssensoren appliziert worden sind, wurde daher eine elektromechanische Zugprüfmaschine gewählt. An dieser können Zugproben mit applizierten FBG-Dehnungssensoren mit einer statischen Belastung von bis zu 20 kN beansprucht werden. Neben einer Kraftmessdose für 20 kN kann auch eine Kraftmessdose für 2 kN für kleinere Belastungen eingesetzt werden. Die maximale Einspannlänge der Proben beträgt 500 mm, so dass neben Standardzugproben auch andersartige, größere Messobjekte untersucht werden können. Pneumatische Spannbackenhalter mit Anschlägen ermöglichen ein einfaches Positionieren der Messobjekte. Die Belastungseinrichtung kann sowohl kraft-, weg-, als auch dehnungsgeregelt betrieben werden. Alle Steuer- und Regeleinheiten der Belastungseinrichtung und der Temperaturkammer sind separat aufgebaut und damit komplett von der Belastungseinrichtung entkoppelt. Dadurch werden keine Schwingungen durch laufende Lüfter o.ä. auf das Messobjekt übertragen.

Die Temperaturkammer ist ebenso fahrbar auf einem Gestell gelagert und damit von der Belastungseinrichtung entkoppelt, um keine zusätzlichen Schwingungen auf die Maschine zu übertragen. Damit kann die Temperaturkammer bei Bedarf eingesetzt oder zurückgeschoben werden. Diese kann autonom gesteuert werden, ist aber auch in die Steuerung des gesamten Prüfplatzes eingebunden. Der Temperaturbereich der Kammer liegt bei einer Regelabweichung von ± 1 K zwischen -68 °C bis +100 °C. Die Temperierung erfolgt durch ein Kälteaggregat. Das

Gestell, auf dem die Temperaturkammer gelagert ist, und das Kälteaggregat sind auf Dämpfern installiert. Um eine optimale Vermessung der Proben mit dem ESPI-System zu erreichen, wurde das Sichtfenster der Temperaturkammer vergrößert und mit einem speziellen Glasscheibenpaket ausgestattet. Dies verhindert, dass sich während der Messung an den Scheiben Eis oder Kondensat bilden. Die Temperaturkammer ist zusätzlich mit einem Entfeuchtungssystem ausgestattet, so dass sich bei Temperaturgängen kein Kondenswasser an der Probe oder auf dem Messfeld bildet. Auf eine zusätzliche Regelung der Feuchte wurde beim Aufbau des Prüfplatzes verzichtet, um eine Verkomplizierung der Anlage im Zusammenspiel mit dem optischen Referenzverfahren zu vermeiden. Die weiterführenden Untersuchungen zum Einfluss der Feuchte auf FBG-Dehnungssensoren, wie in Kapitel II.5 erwähnt, werden in weiteren Studien durch Belastung der Messobjekte in Klimakammern mit definierten Prüfzyklen durchgeführt. Dabei soll jeweils vor und nach der Belastung die Dehnungsübertragung in Abhängigkeit von den durchgeführten Feuchtezyklen an der hier erläuterten Prüfeinrichtung bewertet werden.

Für das ESPI-System ist eine spezielle Aufhängung an der Belastungseinrichtung eingebaut worden. Diese soll schwingungsfrei eine optimale Positionierung des Sensorkopfs in Bezug auf das Messfeld der Probe ermöglichen und den Sensorkopf mit dem halben Traversenweg der Belastungseinrichtung mitführen. Eine Mitführung des Sensorkopfs ist unbedingt notwendig, da bei einer starken Deformation des Messobjekts die Anzahl der Interferenzstreifen zu groß und damit eine Auswertung erschwert wird.

In einer komplexen Ablaufsteuerung erfolgt die Steuerung für die einzelnen Komponenten (Temperaturkammer, Belastungseinrichtung und ESPI-System) durch ein Programm basierend auf der Programmiersprache testXpert II. Dieses Programm ist modular aufgebaut (siehe Kapitel III.1.2): Neben Kraft-Weg-Diagrammen können auch eine Bestimmung des E-Moduls von Werkstoffen, Spannungs-Dehnungs-Diagramme etc. programmiert werden. Über eine Steuerbox stehen zur Synchronisation mit weiteren Messgeräten Kraft, Weg und zwei weitere analoge Kanäle zur Verfügung. Die Messwertübertragung von der Steuerungseinheit beträgt 500 Hz.

Insgesamt ist die Prüfeinrichtung modular aufgebaut, d. h., sowohl Belastungseinrichtung, Temperaturkammer als auch ESPI-System sind im Zusammenspiel wie auch unabhängig voneinander einsetzbar. Die Aufhängung des ESPI-Systems ist auch für die 3D-Stereokorrelation als Referenzverfahren nutzbar. Zusätzlich können neben ESPI und 3D-Stereokorrelation auch DMS und ein mechanisches Hochtemperatur-Extensometer als Referenzverfahren eingesetzt werden. Die Prüfeinrichtung ermöglicht einen kompletten Umbau hinsichtlich Kraftbereich, Einbaulänge der Proben, Referenzverfahren und Temperaturbereich, so dass speziell auf die Anforderungen von Kunden eingegangen werden kann.

In Abb. 46 ist die Prüfeinrichtung mit dem ESPI-System dargestellt.

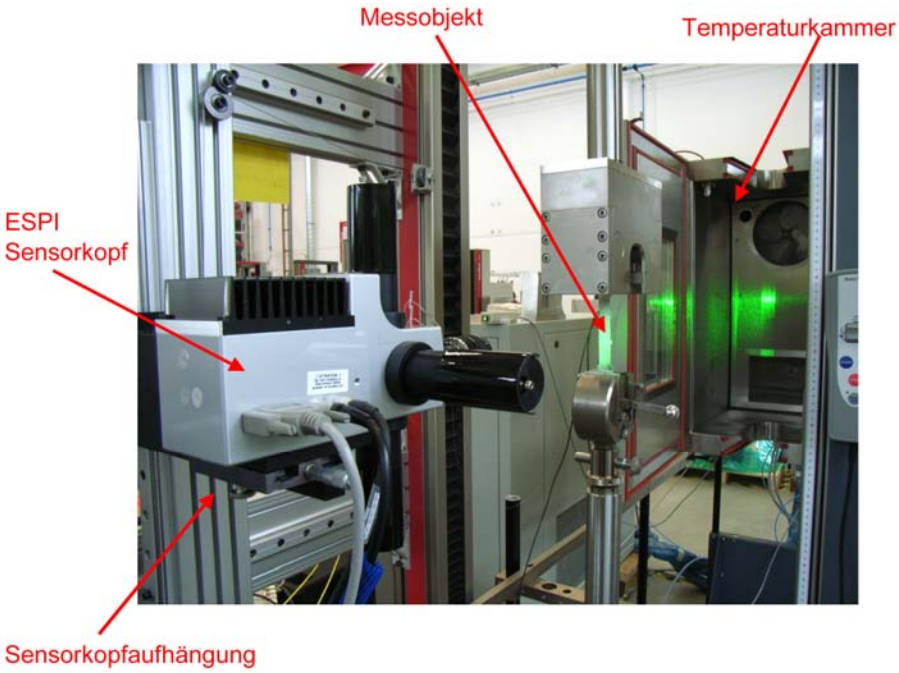


Abb. 46: KALFOS-Anlage: Der Sensorkopf ESPI beleuchtet die eingespannte Probe. Im Hintergrund ist die verschiebbare Temperaturkammer zu erkennen.

In Abb. 47 ist die Prüfeinrichtung KALFOS mit der 3D-Stereokorrelation an der Sensorkopfaufhängung zu erkennen. Abb. 48 zeigt ein typisches Messobjekt mit drei unterschiedlich applizierten FBG-Dehnungssensoren und dem für die 3D-Stereokorrelation aufgesprühten typischen schwarz-weißen fleckenartigen Muster.

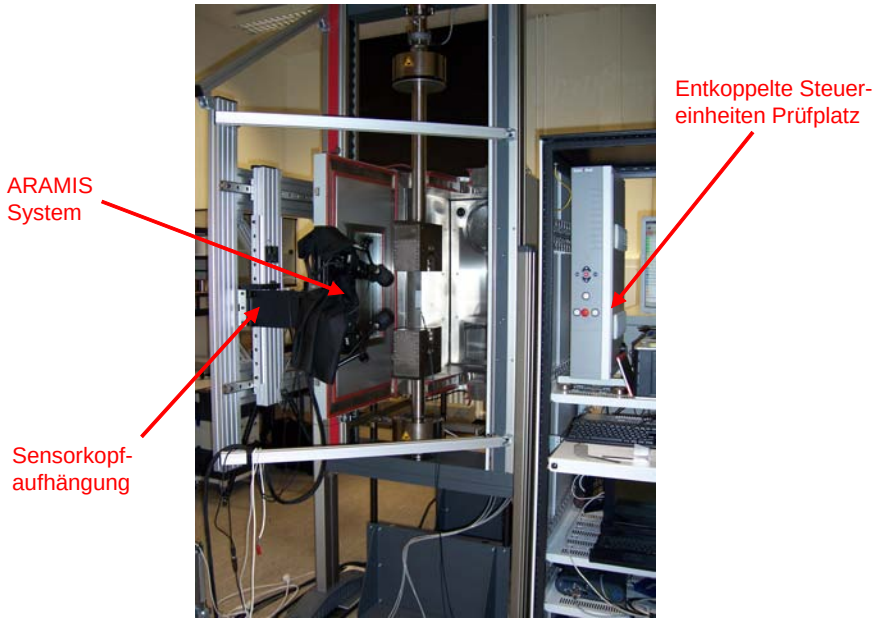


Abb. 47: KALFOS-Aufbau mit 3D-Stereokorrelation als Referenzverfahren.

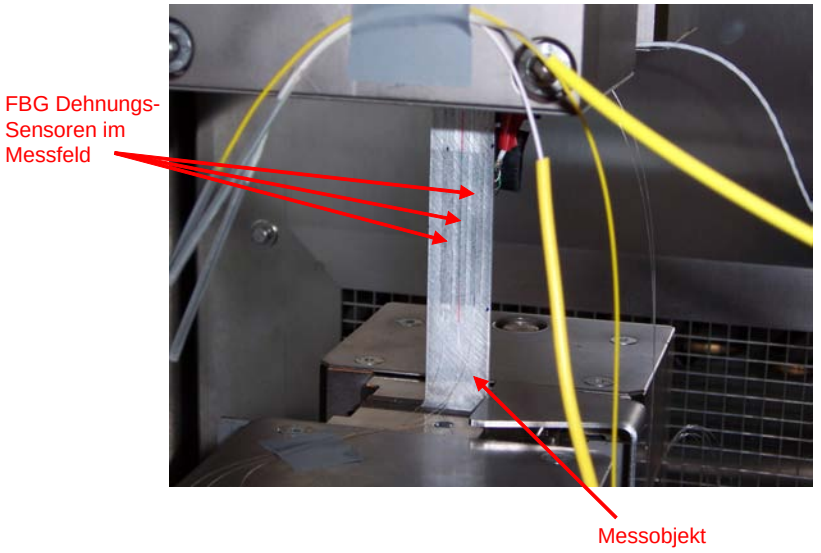


Abb. 48: Eingespanntes Messobjekt in KALFOS. Zu erkennen ist das schwarz-weiße fleckenartige Muster, das das Messfeld markiert. Auf dem Messobjekt sind drei FBG-Dehnungssensoren appliziert. Im Hintergrund ist ein Teil der Temperaturkammer zu erkennen.

III.1.3 Datenverarbeitung und Programmierung

Zum Auslesen der FBG-Dehnungssensoren aus dem Interrogator ist ein Programm auf Basis des Befehlsdatensatzes der Firma Micron Optics Inc. in LabView erstellt worden. Andere Messsysteme, wie der Messverstärker für DMS, sind ebenfalls in dieses Programm eingebunden und können ausgelesen werden, so dass eine aufwendige Synchronisation von Messdatensätzen im Nachhinein entfällt. Dieses Programm ist als Grundprogramm zu verstehen, das an die jeweilige Messaufgabe angepasst und optimiert werden kann.

Die Steuerung der Prüfeinrichtung KALFOS mit Temperaturkammer und ESPI-System erfolgt auf Basis des Programms testXpert II. Zunächst wird die gewünschte Temperatur angefahren und gewartet, bis das thermische Gleichgewicht in der Temperaturkammer erreicht ist. Danach wird ein Referenzbild mit dem ESPI-System aufgenommen, wobei die Temperaturregelung und die Ventilation während der Bildaufnahme (ca. 6 Sekunden) über eine Triggerschaltung aus- und danach wieder eingeschaltet werden. Dies dient dazu, dass sich durch Abschalten der Ventilation keine Luftverwirbelungen (und damit unerwünschte Verzerrungen des Bildes) zwischen dem Messobjekt und der Kamera des ESPI-Systems bilden. Ist die Temperaturregelung wieder eingeschaltet, wird die nächste Belastungsstufe angefahren und dann das nächste Bild aufgenommen.

III.1.4 Nutzungsprofil des Messplatzes KALFOS

Die hier vorgestellte Prüfeinrichtung KALFOS ist modular bezüglich der Soft- als auch Hardware derart aufgebaut, dass sie für ganz unterschiedliche Prüfaufgaben eingesetzt werden kann. Im Zusammenhang mit dieser Arbeit beinhaltet die Prüfaufgabe die Bewertung des Dehnungsübertragungskoeffizienten von unterschiedlich gecoateten FBG-Dehnungssensoren in Abhängigkeit von Klebstoff, Applizierung und Vorspannung unter Temperaturbeanspruchung und mechanischer Belastung der Messobjekte. Weitere mögliche durchführbare Prüfaufgaben können sein:

- Vergleichende Bestimmung des Dehnungsübertragungskoeffizienten von FBG-Dehnungssensoren in Form von Patches verschiedener kommerzieller Hersteller
- Bewertung von in der Entwicklung befindlichen Patches
- Untersuchung des Alterungseinflusses auf die statische Langzeitstabilität von faseroptischen Sensoren
- Bestimmung von Werkstoffeigenschaften verschiedener Materialien, wie E-Modul oder thermische Ausdehnungskoeffizienten mit verschiedenen Referenzverfahren
- Bestimmung von spektral-optischen Phänomenen faseroptischer Sensoren unter sich ändernden Temperatur- und Lastbedingungen und eine danach ausgerichtete Optimierung der Signalverarbeitung durch eine zusätzliche Erweiterung der Prüfeinrichtung (siehe Kapitel III.2.2)
- Untersuchung und Vergleich der verschiedenen Dehnungsreferenzmethoden, beispielsweise DMS, Extensometer, 3D-Stereokorrelation oder ESPI zueinander, um eine optimale Rückführung der Methoden zu bestimmen

Zum letzten hier aufgeführten Punkt sind bereits erste Untersuchungen durchgeführt worden. Ziel dieser Untersuchungen war ein direkter Vergleich zwischen DMS und FBG. Mit drei gleichartig gefertigten Aluminiumproben, auf denen auf der einen Seite ein FBG mit Ormocer®-Coating, daneben ein DMS und auf der anderen Seite ein weiterer DMS appliziert wurden, wurden mechanische Belastungsversuche bei Raumtemperatur durchgeführt. Dabei sollte geklärt werden, ob es einen Dehnungsunterschied aufgrund der Applizierung und des Klebstoffs zwischen FBG und DMS gibt. Die aufgebrachten Dehnungen lagen bei maximal 1200 µm/m. Durch diese Versuche war ein direkter Vergleich an drei gleichartigen Proben zwischen FBG, DMS und 3D-Stereokorrelation möglich. Die FBG-Sensoren wurden mit MBond 610 auf den Proben appliziert. In Abb. 49 ist eine Probe mit applizierten Sensoren dargestellt. Darunter ist in Abb. 50 die bereits mit Lack präparierte Probe für die 3D-Stereokorrelations-Messung zu sehen.

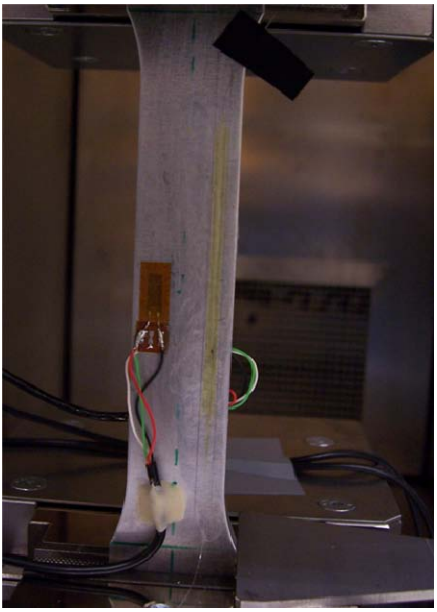


Abb. 49: Zugprobe mit appliziertem FBG und DMS.

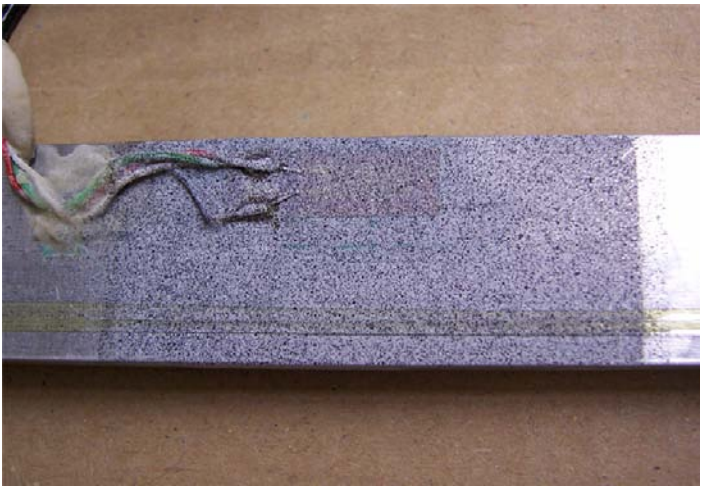


Abb. 50: Präparierte Zugprobe für Dehnungsmessung mit 3D-Stereokorrelation. Im hinteren Bereich des Bildes ist der DMS zu erkennen, vorn ist der FBG-Sensor appliziert.

Zunächst wurde für die drei Proben die Dehnung des vorderen DMS mit der ermittelten Dehnung der Probenoberfläche aus der 3D-Stereokorrelations-Messung verglichen. Für die optische Faser wurde ein Facettenfeld der Größe 0,1 mm x 18 mm gewählt und für den DMS wurde ein Facettenfeld der Größe 4 mm x 8 mm gewählt. Dabei sind im DMS-Facettenfeld 1128 Facetten zusammengefasst und im Faser-Facettenfeld 103 Facetten. Dies liegt daran, dass im

Gegensatz zum DMS-Facettenfeld im Faser-Facettenfeld die Facetten relativ groß gewählt werden mussten, um das Koordinatenrauschen (in Form von Kippen der Facette im Raum) zu minimieren. In Abb. 51 ist zu erkennen, dass für alle drei Proben die Dehnungen des DMS gut mit den aus der 3D-Stereokorrelation ermittelten Probendehnungen korrelieren. Die Abweichungen liegen innerhalb der Messunsicherheiten der beiden Messverfahren.

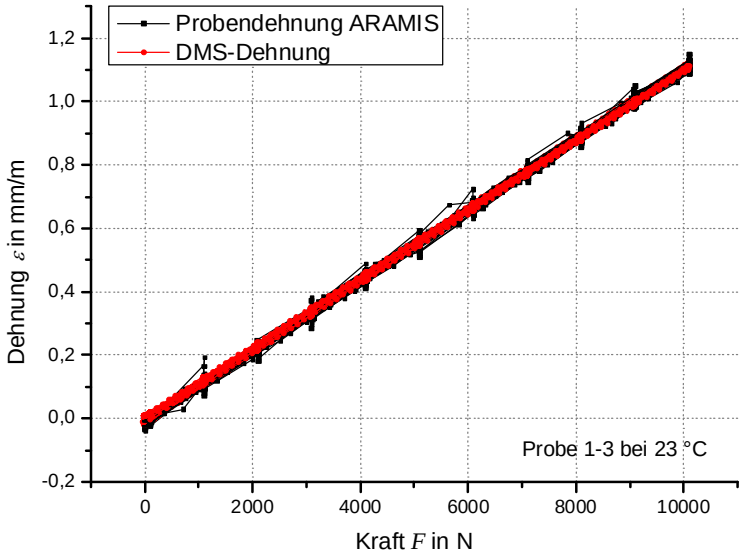


Abb. 51: Vergleich zwischen der mit der 3D-Stereokorrelation ermittelten Probendehnung und der Dehnung der DMS. Dargestellt sind die Messergebnisse aller drei Proben.

Obwohl aus Abb. 51 hervorgeht, dass die DMS der Dehnung der Proben folgen, konnte bei einer Probe festgestellt werden, dass der DMS sich von der Probe zu lösen beginnt. In Abb. 52 sind das Verschiebungsfeld dieses DMS und die Verschiebungen an den Schnitten dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass auf die linke obere Ecke des DMS nicht die vollständige Dehnung übertragen wird.

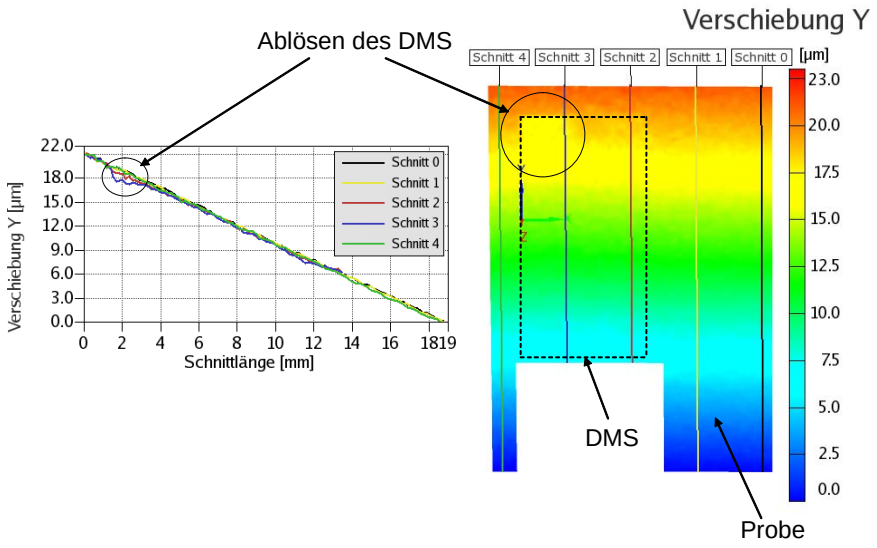


Abb. 52: Verschiebungsfeld des DMS und der Probe. Auf den DMS wird bei erhöhter Last in der linken oberen Ecke nicht die vollständige Dehnung übertragen. Vermutlich löst sich der DMS von der Probe.

In der Schnittdarstellung zeigt sich dieses Verhalten durch ein Absinken der Verschiebung in Schnitt 3. Das Lösen des DMS von der Probe und somit die unzureichende Dehnungsübertragung ist in den Messwerten in Abb. 51 nicht zu erkennen, weil die dehnungsempfindlichen Mäanderdrähte des DMS nicht bis in den linken oberen Teil des DMS hineinreichen. Damit wird deutlich, dass der enorme Vorteil dieses Referenzverfahrens in der visuellen Dehnungserfassung an derselben Messstelle wie der zu referenzierenden Sensoren liegt. Eine frühzeitige Erkennung von Ablösevorgängen, noch bevor das sensitive Element des Sensors betroffen ist und falsche Messwerte liefert, ist nur mit dieser Art der Referenzierung möglich. Somit kann gezielt die zuverlässige Funktionsweise der Sensoren sichergestellt werden und diese können, bevor sie falsche Messwerte liefern, ausgetauscht werden.

Mit der 3D-Stereokorrelation konnte ein Vergleich zwischen der Dehnung des FBG, des Klebstoffs und der Probe durchgeführt werden. Dabei zeigte sich für alle drei Proben, dass die FBG-Sensoren eine gute Haftung aufweisen und die ermittelten Messergebnisse gut mit den Dehnungen der Proben übereinstimmen. Beispielhaft für alle durchgeführten Versuche ist die Dehnung von FBG, Klebstoff und Probe für einen Probekörper in Abb. 53 dargestellt.

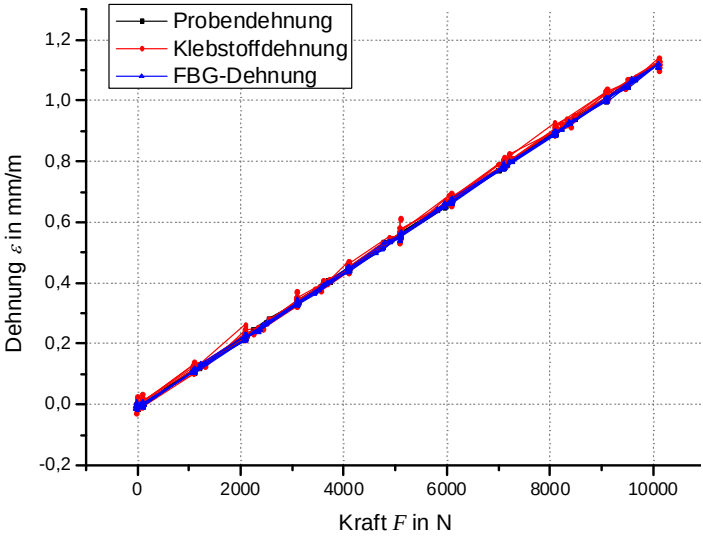


Abb. 53: Vergleich der Dehnungen zwischen Probe, Klebstoff und FBG.

Die gute Dehnungsübertragung zwischen Probe und FBG kann auch mit der aus der Wellenlängenänderung ermittelten Dehnung mit der aus der 3D-Stereokorrelation ermittelten Probendehnung korreliert werden. Der so ermittelte Dehnungsübertragungskoeffizient für die drei applizierten FBG-Sensoren mit Ormocer®-Coating beträgt 0,780 ± 0,009.

III.2 Charakterisierung der Prüfeinrichtung

Zur Charakterisierung der Prüfeinrichtung, und damit zur Bestimmung der Eignung dieser Messmethodik, gehört die Ermittlung aller auf die Messgröße Einfluss nehmenden Messunsicherheiten. Die hier angewandte Messmethodik zur Bestimmung der Dehnungsübertragung ist der Vergleich der gemessenen Wellenlängenänderung eines auf einem belasteten Messobjekt applizierten FBG-Dehnungssensors mit der gemessenen Dehnung des Messobjekts durch das 3D-Stereokorrelations-Verfahren. Die Messgrößen sind somit die Bragg-Wellenlänge und die Dehnung der Messobjektoberfläche, detektiert mit der 3D-Stereokorrelation. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass das ESPI-Verfahren das der Validierung zugrunde gelegte Referenzverfahren ist, das an der Anlage genutzt werden soll. Der immense Programmieraufwand des ESPI-Sensorkopfes macht eine zeitnahe Anwendung des Systems jedoch nicht möglich, so dass zunächst die Prüfeinrichtung mit der 3D-Stereokorrelation charakterisiert wird.

III.2.1 Messunsicherheit

Die beiden Messgrößen Bragg-Wellenlänge und Dehnung der Messobjektoberfläche, aus denen die Dehnungsübertragung rechnerisch ermittelt wird, werden aufgrund der unterschiedlichen Messgeräte, die auch auf unterschiedlichen Messprinzipien basieren, durch verschiedene Parameter beeinflusst. Beide Messgrößen sind durch die Einflüsse der Belastungseinrichtung, die die Deformation auf das Messobjekt aufbringt, miteinander verknüpft. Die Bestimmung der Messunsicherheiten bildet den Kern der Charakterisierung der Prüfeinrichtung. Bisher sind im Rahmen dieser Arbeit folgende Untersuchungen zur Bestimmung der Messunsicherheiten auf die Messgrößen durchgeführt worden:

1. Es wurde die Zeitdauer bestimmt, die die Belastungseinrichtung mit dem eingespannten Messobjekt benötigt, bis diese bei geschlossener Temperaturkammer ein thermisches Gleichgewicht innerhalb der Kammer erreicht hat. Diese Zeit liegt sowohl bei -60 °C als auch bei +80 °C bei ca. 1,5 h und ist deshalb so groß, weil das Kammervolumen relativ groß ist und die pneumatischen Spannbacken aus Edelstahl ein enormes zu temperierendes Volumen darstellen.
2. Bei konstanter Last F = (1997 N ± 7 N) wurde das Koordinatenrauschen der 3D-Stereokorrelation, das zu einer Messunsicherheit in der rechnerisch ermittelten Dehnung führt, bestimmt. Bei 181 Bildern, also 181 Messpunkten bei konstanter Belastung, konnte eine Abweichung in der Verschiebung von ± 2 µm festgestellt werden. Dies zeigt sich in einer Messunsicherheit in der ermittelten Dehnung von ± 20 µm/m.

3. Beim Einspannen der Messobjekte wirkte durch die Fertigungstoleranzen der Spannbacken und der starren Konstruktion der Probenhalteraufhängung (ohne Gelenk) eine Druckkraft von 1,5 kN in Achsrichtung auf die Messobjekte. Diese Druckkraft verursachte bei einigen Messobjekten ein plastisches Verbiegen. Die Ursache liegt in den Spannbacken. Diese werden in die Probenhalter eingehakt und haben geringes Spiel, so dass die Proben selbst bei optimaler Ausrichtung ungleichmäßig geklemmt werden. Dieses Problem wurde durch eine gesonderte Programmierung der Probenhalterregelung beseitigt. Dabei wird die beim Schließen der Spannbacken aufgebrachte Kraft auf das Messobjekt ausgeregelt, so dass das Messobjekt annähernd druckfrei in der Halterung eingespannt ist.
4. Ein Abgleich zwischen dem Traversenweg und dem tatsächlich zurückgelegten Weg des Messobjekts durch Verifizierung der Messobjektverschiebung mit der 3D-Stereokorrelation ergab einen um ca. 200 µm größeren Traversenweg der Belastungseinrichtung bei Beanspruchung im Vergleich zur Verformung des Messobjekts. Dies liegt am Verlust von Weg an den Verschraubungen und Aufhängungen der Probenhalter und der Kraftmessdose. Bei Messungen, bei denen der Traversenweg rechnerisch berücksichtigt wird, muss beachtet werden, dass die eigentliche Verschiebung des Messobjekts um 200 µm geringer ist. Diese Toleranz ist für eine Universal-Werkstoffprüfmaschine sehr gut, für Messungen von kleinsten Dehnungen jedoch ein sehr hoher Wert.

Es wurden Untersuchungen zur Verwendbarkeit der Kalibrierung und der Messung mit der 3D-Stereokorrelation durch die Glasscheiben der Temperaturkammer durchgeführt. Zunächst wurde jedoch ohne Temperaturkammer kalibriert und auch das Messobjekt vermessen. Da für eine Kalibrierung mit definierten Kalibrierscheiben diese manuell gedreht und von den Kameras erkannt werden müssen, war eine Kalibrierung mit Temperaturkammer nicht möglich, da eine manuelle Drehung des Kalibrierkörpers bei geschlossener Tür der Temperaturkammer nicht durchgeführt werden konnte. Daher wurde zunächst eine Kalibrierung durch das Sichtfenster der geöffneten Temperaturkammer durchgeführt und das Messobjekt nachträglich in die Maschine eingebaut. Dieser Versuch wurde bei Raumtemperatur durchgeführt, um die Möglichkeit einer Kalibrierung durch das Sichtfenster mit diesem System zu testen. Aufgrund des großen Abstands zum Messobjekt, das sich in der Mitte der Temperaturkammer befindet, wurde mit Objektiven mit 100 mm Brennweite gearbeitet. Die Kalibrierung ist auf diese Weise zwar gelungen, aber die Bilder des Messobjekts waren teilweise unscharf. Damit wurden zwar die einzelnen Messpunkte erkannt, aber das System konnte keine korrekte Berechnung durchführen. Verschiedene Ansätze zur Quantifizierung dieser Unschärfe bei Messung durch das Sicht-

fenster sind bereits durchgeführt worden, darunter das Tauschen von Objektiven, das Ändern des Winkels zwischen den Kameras, das Verschieben des gesamten Kamerasystems zu einer anderen Position vor dem Sichtfenster und das Minimieren von Reflexionen durch Streulicht. Bisher hatte keiner dieser Versuche zu dem gewünschten Ergebnis geführt. Versuchsmessungen, bei denen eine Kalibrierung durch eine einfache Fensterglasscheibe (als Ersatz für das Sichtfenster der Temperaturkammer) durchgeführt wurde, zeigten, dass bei einfachem Glas eine Messung möglich ist. Die Untersuchungen zur Quantifizierung und Behebung der Messproblematik bei einem Glasscheibenpaket werden zurzeit noch durchgeführt. Für die spätere Kalibrierung des 3D-Stereokorrelations-Verfahrens bei Messung mit Temperaturkammer ist ein spezieller Kalibrierkörper konstruiert worden, der durch Ansteuerung von Motoren ein autonomes Drehen des Kalibrierkörpers in der Temperaturkammer möglich macht.

Eine Reihe weiterer Untersuchungen zur vollständigen Charakterisierung des Messplatzes müssen noch ergänzend durchgeführt werden. Hier sind zunächst die wichtigsten noch ausstehenden Hauptuntersuchungen genannt.

1. Die Messunsicherheit des FBG-Antwortsignals, bedingt durch das Stabilitätsverhalten des Lasers und des hinterlegten mathematischen Algorithmus zur Berechnung der Bragg-Wellenlänge, sind bisher nicht berücksichtigt worden. Die Kalibrierung des Messgeräts erfolgte durch den Hersteller. Die Erweiterung und Verbesserung des Fitalgorithmus´, insbesondere bei durch Querkräfte deformierten Spektren, muss für eine präzise Bestimmung der Bragg-Wellenlänge entscheidend weiterentwickelt werden.
2. Das Temperierverhalten der Temperaturkammer kann mit einem kalibrierten Temperaturmesssystem ausgemessen werden, um die Abweichung der Soll- von der Ist-Temperatur innerhalb der Kammer zu bestimmen.
3. Eine Reihe von Belastungsmessungen an Standardzugproben, bei der stets eine bestimmte Kraft, ein bestimmter Weg oder eine bestimmte Dehnung vorgegeben wird, ist zur Bestimmung der Wiederholbarkeit der Messungen durchzuführen. Die Anzahl der zu testenden Proben sollte mindestens 10 betragen. Dabei sollten je Probe einige hundert Belastungszyklen durchgeführt werden, um eine statistische Aussage über die Wiederholbarkeit zu erlangen. Diese Untersuchungen sollten mit einer Vielzahl unterschiedlicher Probengrößen durchgeführt werden, um den Verschleiß der Spindel an bestimmten Stellen (bei immer gleicher Probengröße und immer gleichem Weg) aus der Errechnung der Messunsicherheit zu ermitteln.
4. Generell muss die Beeinflussung des Messobjekts auf die Prüfeinrichtung bestimmt bzw. durch geeignete Maßnahmen ausgeschlossen werden.

5. Es muss überprüft werden, inwieweit thermisch bedingte Luftverwirbelungen innerhalb der Temperaturkammer, sogenannte Schlieren, die Messempfindlichkeit der 3D-Stereokorrelation und des hochauflösenden ESPI-Systems beeinflussen. Für diese Untersuchungen müssen jedoch speziell angefertigte Kalibrierkörper (im Gegensatz zu den herkömmlichen Kalibrierscheiben, siehe Abschnitt III.1.1.1) zunächst geprüft und eingesetzt werden, die durch Motoren innerhalb der Temperaturkammer zwecks Kalibrierung autonom gedreht werden können.

Generell hängt die Messunsicherheit bei der Dehnungsermittlung der Messobjektoberfläche durch die 3D-Stereokorrelation von mehreren Faktoren ab. Zum einen sind die Ebenheit und die Eignung des Glasscheibenpakets der Temperaturkammer für die Bestimmung der Dehnung durch das optische Referenzverfahren von wesentlicher Bedeutung. Erste Schritte zur Quantifizierung dieser Problematik sind bereits angesprochen worden. Die Genauigkeit, mit der die 3D-Stereokorrelation die Dehnung bestimmen kann, ist prinzipiell von der Genauigkeit, mit der die 3D-Koordinaten der einzelnen definierten Facetten bestimmt werden können, abhängig. Eine Quantifizierung dieses Meßsystems kann erst bei Nutzung eines Bezugnormals (siehe Kapitel III.2.2) bzw. durch Abgleich mit anderen Referenzverfahren (siehe Kapitel III.1.4) durchgeführt werden. Dabei hängen die Messempfindlichkeit und damit die Genauigkeit der 3D-Stereokorrelation von der Güte der jeweiligen vor der Messung durchgeführten Kalibrierung und dem Abstand der Kameras vom Messobjekt ab. Das mathematische Modell bzw. der Fitalgorithmus des Messsystems zur Identifikation der Facetten, des Strahlengangs und des Signal-Rausch-Verhältnisses zu Nachbarfacetten bestimmt im Wesentlichen die Qualität des Messergebnisses. Das Rauschmaß kann durch die Wahl der Facetten und Maskierungen beeinflusst werden und ist somit von der individuellen Prüfaufgabe und dem Messobjekt abhängig.

III.2.2 Optimierung des Messplatzes

Aus den schon durchgeführten Untersuchungen zur Charakterisierung des Messplatzes ergeben sich im Folgenden wichtige Punkte zur Optimierung des Messplatzes. Die einzelnen Optimierungspunkte sind hier kurz erläutert:

- Für die Messungen mit dem 3D-Stereokorrelations-Verfahren muss der konstruierte Kalibrierkörper für die Temperaturkammer gefertigt und erprobt werden, der das Öffnen der Kammertür während Temperaturtests und das manuelle Drehen des Kalibrierkörpers vermeidet, so dass das eingestellte thermische Gleichgewicht für die Messungen nicht gestört wird.
- Für die Nutzung des hochempfindlichen ESPI-Systems zur Referenzierung ist eine Verbesserung der Mitführung des ESPI-Sensorkopfs bzw. eine

Neukonstruktion der Sensorkopfaufhängung in Planung. Die Sensorkopfaufhängung hat sich bei ersten Messungen mit dem ESPI-System an der Belastungseinrichtung als zu schwingungsempfindlich herausgestellt und wird daher ersetzt. Notwendige, weitere konstruktive schwingungsminimierende Maßnahmen, wie die Versteifung der Temperaturkammerführung und das Ersetzen des Schließmechanismus der Kammer, sind in Planung.

- Die Quantifizierung der spezifischen spektral-optischen Phänomene während der Dehnungsübertragung können mit dem zurzeit an der Anlage eingesetzten Interrogator und dem OSA nur unzureichend beschrieben werden. Für die Prüfanlage ist der Einsatz eines Optical Backscatter Reflectometer (OBR) vorgesehen. Das Messgerät arbeitet auf Basis der Rayleigh-Rückstreuung in Single-Mode-Glasfasern und ist ähnlich einem optischen Frequenzbereichreflektometer aufgebaut. Die Auflösung des Geräts beträgt 10 µm auf 30 m Messlänge bzw. 0,02 pm in der Wellenlänge. Dabei ist eine Analyse des spektralen Antwortsignals sowohl bezogen auf die physische (örtliche) Ausdehnung des Sensorelements als auch im Frequenzbereich möglich. Somit können verschiedene Applizierungsmethoden der FBG-Dehnungssensoren und ihr Einfluss auf das spektrale Antwortsignal über die Länge der Verklebung analysiert und verbessert werden. Für die Optimierung von Applizierungen und die Charakterisierung integrierter Sensorik im Hinblick auf das Antwortsignal der FBG-Dehnungssensoren ist dieses Messgerät ein wertvoller Bestandteil der Prüfeinrichtung. Das Messgerät muss noch in die Ablaufsteuerung der Prüfeinrichtung softwaretechnisch eingebunden werden.
- Für den Einsatz der Prüfeinrichtung ist die Entwicklung eines Bezugnormals zur Kalibrierung der Prüfeinrichtung bzw. die Entwicklung eines Standard-Prüfkörpers von zentraler Bedeutung. Dies ist für die Rückführbarkeit der Messgrößen wichtig. Dabei können als Bezugsnormale für die Messobjekte Zugproben nach DIN-Norm eingesetzt werden. Die auf die Zugproben applizierten FBG-Dehnungssensoren müssen über einen langen Zeitraum (mind. 5 Jahre) ein stabiles Antwortsignal liefern. D. h., für ein Bezugsnormal muss eine Änderung der Bragg-Wellenlänge aufgrund von Alterung der Sensoren oder des Klebstoffs über einen definierten Zeitraum durch Prüfung ausgeschlossen worden sein. Es muss zusätzlich eine Prüfvorschrift entwickelt und in dieser festgehalten werden, dass bei einer bestimmten Belastung (Kraft, Weg und Dehnung) eine bestimmte von der 3D-Stereokorrelation zu

detektierenden Dehnung der Messobjektoberfläche und vom Bezugs-FBG-Dehnungssensor ein definiertes Antwortsignal zu erwarten ist. Mit diesen Bezugsnormalen und einer solchen Prüfvorschrift kann die Prüfeinrichtung kalibriert und alle durchgeführten Untersuchungen auf die Bezugsnormale zurückgeführt werden. Dies ist ein wesentlicher Bestandteil zum Nachweis der Erfüllung der Validierungsaufgabe und ermöglicht einen Vergleich mit den Qualitätsanforderungen von Kunden.

- Weitere notwendige Optimierungsmaßnahmen der Prüfeinrichtung ergeben sich aus den Prüfanforderungen und den Wünschen der Kunden. Dazu gehört beispielsweise, dass der Nutzen der Prüfeinrichtung durch ihren modularen Aufbau nicht allein auf oberflächenapplizierte FBG-Dehnungssensoren beschränkt ist. Durch Anpassung der Prüfeinrichtung ist die Bewertung der Dehnungsübertragungen von DMS, piezoelektrischen Sensoren oder weiteren oberflächenapplizierten Sensoren ebenfalls möglich sind.

Die Prüfeinrichtung ist in der vorliegenden Ausbaustufe als Basisversion eines Validierungsmessplatzes zu verstehen. Die Tauglichkeit des optischen Referenzverfahrens zur Bestimmung der Dehnungsübertragung konnte sowohl mit der 3D-Stereokorrelation als auch mit dem ESPI-System gezeigt werden. Die Optimierung des Messplatzes als Validierungsmessplatz ist aufbauend auf der hier durchgeführten Charakterisierung Bestandteil weiterführender Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

IV FBG-Dehnungssensoren als Patches

Nicht immer können oberflächenapplizierte FBG-Dehnungssensoren, wie sie bereits hier vorgestellt worden sind, zur Dehnungsmessung genutzt werden. Dies liegt an verschiedenen Bedingungen, vorgegeben durch die Werkstoffe des Messobjekts und deren Herstellungs- und Verarbeitungsprozess, die Temperatur- und Umgebungsbedingungen während der Applizierung bzw. des späteren Gebrauchs, die Belastungsbedingungen und die Messstelle selbst (z. B. integriert). Um die Handhabung von FBG-Dehnungssensoren unter diesen zum Teil harschen Bedingungen einfacher zu gestalten, werden die Sensoren in ein Trägermaterial eingebettet oder auf diesem appliziert. Diese sogenannten Patches können dann auf einfache Weise in die Struktur integriert bzw. auf die Oberfläche appliziert werden. Patches gibt es von kommerziellen Anbietern bereits in verschiedenen Ausführungen. Bei Applizierungen, bei denen sehr spezifische Anforderungen an das Sensorpatch gestellt werden, die kommerzielle Patches nicht erfüllen, ist eine speziell angepasste, eigene Patchentwicklung notwendig (siehe Kapitel IV. 2).

IV.1 Kommerzielle Patches

Der einfacheren Handhabbarkeit wegen und auch, um die FBG-Technologie auf einfachere Weise einem breiten Anwenderkreis zugänglich zu machen, werden von verschiedenen Herstellern FBG-Dehnungssensoren als Patches angeboten. Für einen Techniker ist die Handhabung und Applizierung von FBG-Dehnungssensoren als Patches besonders dann einfacher, wenn die Messstellen schwer zugänglich sind. Zudem bieten die Trägermaterialien dem FBG-Sensor einen zusätzlichen mechanischen Schutz. Patches sind bereits vorkonfektioniert mit Steckern erhältlich. Meist sind die Trägermaterialien der Patches nicht für alle Messobjekte verwendbar, sondern an bestimmte Werkstoffe angepasst. Deswegen reicht die Vielfalt der Trägermaterialien für Patches von CFK oder GFK über Edelstahl bis hin zu Folien. Je nach Konstruktion der Patches sind die maximale Dehnbarkeit und der Temperatureinsatzbereich sehr unterschiedlich. Von den einzelnen Herstellern können die Datenblätter im Einzelnen angefordert werden, viele der Patches sind von den Anbietern patentiert worden [DE51], [EP97]. Eine Vergleichbarkeit der Patches ist oft schwierig, da die Datenblätter wichtige Kenngrößen oft unterschiedlich ausweisen und z. T. nur unvollständige Angaben enthalten sind.

IV.2 Patches zur Oberflächenapplizierung

Im Verbundprojekt „IMO-Wind“ (Integrales Monitoring- und Bewertungssystem für Offshore-Windenergieanlagen) der BAM waren faseroptische Sensoren zur Zustandsüberwachung von Rotorblättern von Windenergieanlagen zu installieren [IMO]. Für die Oberflächenapplizierung der FBG-Dehnungssensoren auf die Rotorblätter wurden Patches entwickelt.

Hierbei waren spezielle Anforderungen an die FBG-Dehnungssensoren hinsichtlich Dehnungs- und Temperaturbereich zu beachten. Die Sensoren mussten aufgrund des erwarteten großen Dehnungsbereichs von ± 2 mm/m in Zug- und in Druckrichtung belastbar sein und daher um mindestens 1000 µm/m vorgespannt werden. Die Sensorpatches mussten stabil gegenüber Kriecheffekten und Nullpunktsdrift der Bragg-Wellenlänge sein. Die Applizierung im Rotorblatt eines Prototyps einer Offshore-Windkraftanlage geschah nachträglich. Hieraus ergaben sich deutlich erhöhte Anforderungen an die Handhabbarkeit der FBG-Dehnungssensoren. Diese wurden deshalb in Form von Patches appliziert.

IV.2.1 Konzept und Aufbau

Zunächst wurden geeignete GFK-Gewebe ausgewählt und mit verschiedenen Epoxidharzen vergossen, um verschiedene Konstruktionsvarianten der Patches zu untersuchen. Die Konstruktion des Patches musste schrittweise verbessert werden, bis das Patch die gewünschten Anforderungen erfüllte. Das Patch besteht aus einem vierlagigen Gewebeaufbau, wobei das FBG zwischen Lage zwei und drei eingebettet ist. Der Gewebeaufbau ist so gewählt, dass das Patch in Wirkungsrichtung die geringste Steifigkeit besitzt und somit der Einfluss auf das Messobjekt minimiert ist. Um unnötige Übergangszonen der Dehnung zu vermeiden, wurde das Coating der FBG-Dehnungssensoren stellenweise thermisch entfernt. Damit die Glasfaser sicher aus dem Patch herausgeführt werden konnte, wurde diese mit Kapillaren und einer Kunststoffummantelung versehen. Die geforderte Vorspannung wurde durch eine für diesen Zweck entwickelte Vorrichtung zum Vorspannen der FBG-Dehnungssensoren eingetragen. Die Vorspanneinrichtung konnte während der Temperung in den Ofen integriert werden. In Abb. 54 ist ein appliziertes Patch auf einer Zugprobe aus Stahl dargestellt.

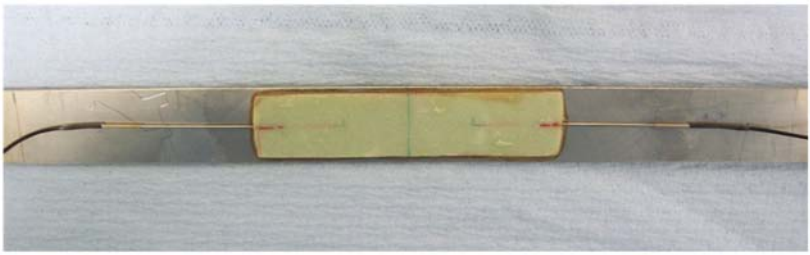


Abb. 54: GFK-Patch mit integriertem FBG-Dehnungssensor, appliziert auf einer Zugprobe.

IV.2.2 Funktionsnachweis

Bevor die Patches am Rotorblatt installiert wurden, musste deren Funktionsweise reproduzierbar durch Temperatur- und Belastungsversuche nachgewiesen werden. Es musste gezeigt werden, dass das FBG-Messsignal kein Kriechen durch Relaxation des Patchmaterials aufweist. Zudem musste die vorgegebene Vorspannung für den späteren Einsatz der Patches nachgewiesen werden. Daher wurden an den einzelnen Konstruktionsformen jeweils Untersuchungen hinsichtlich Temperaturbeanspruchung und mechanischer Belastung durchgeführt. Den Ergebnissen entsprechend wurde die Konstruktion modifiziert. Das Einstellen der vorgeschriebenen Vorspannkraft stellte sich zunächst als schwierig heraus. Der Herstellungsprozess der GFK-Patches selbst verursachte durch die mechanischen Eigenschaften des Epoxidharzes ein Schrumpfen des Patchmaterials während der Temperung. Somit entstand ein großer Vorspannungsverlust, so dass z. T. die FBG-Dehnungssensoren bis in den Druckbereich belastet wurden. In Abb. 55 ist schematisch der Aushärteprozess von Epoxidharzen dargestellt [Wen05]. Epoxidharzsysteme schrumpfen durch die chemischen Reaktionen während des Aushärtevorgangs, d. h. die Dichte des Materials nimmt zu, während das Volumen kontrahiert.

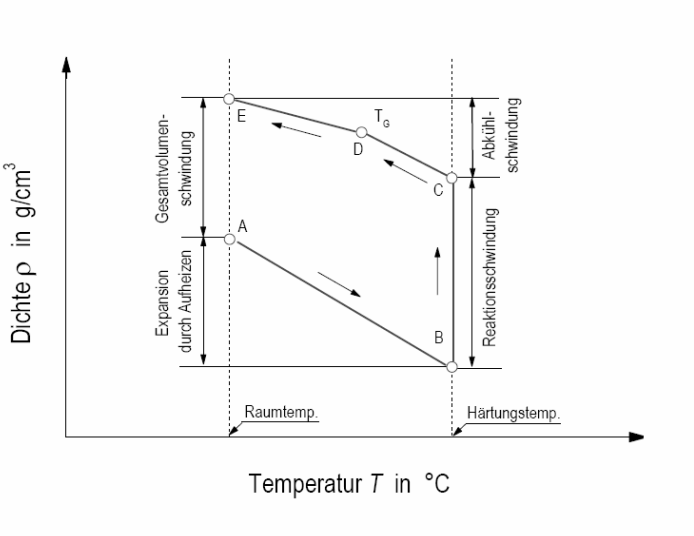


Abb. 55: Schematische Darstellung der Dichteänderung eines Epoxidharzes bei der Aushärtung [Wen05].

Zunächst wird das Epoxidharzsystem von Raumtemperatur auf Härtungstemperatur gebracht, was zu einer Abnahme der Dichte des Materials führt, da sich dieses mit steigender Temperatur verflüssigt. Ist die Aushärtetemperatur erreicht, nimmt durch die chemischen Vernetzungsreaktionen, die dann eintreten, die Dichte zu und das Volumen des Materials entsprechend ab. Diesen Prozess bezeichnet man als Reaktionsschwinden. Beim Abkühlprozess kommt es, bedingt durch die thermische Längenänderung des Materials, zu einer Dichterhöhung bzw. einem Wärmeschrumpfen. Dabei wird auch die Glasübergangstemperatur T_G durchlaufen. Aus Abb. 55 ist ersichtlich, dass der CTE unter- und oberhalb der Glasübergangstemperatur verschieden ist. Je nach eingesetztem Epoxidharzsystem beträgt die Volumenkontraktion, und damit das Schrumpfen, ca. 1 % bis 5 % des Volumens. Beim Aushärtungsprozess der Patches lässt sich dieses Verhalten des Epoxidharzes anhand der Änderung der Bragg-Wellenlänge, und damit der Vorspannung, sehr gut zeigen. Beispielhaft ist in Abb. 56 eine Temperung eines Patches als Änderung der Bragg-Wellenlänge über der Zeit in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt.

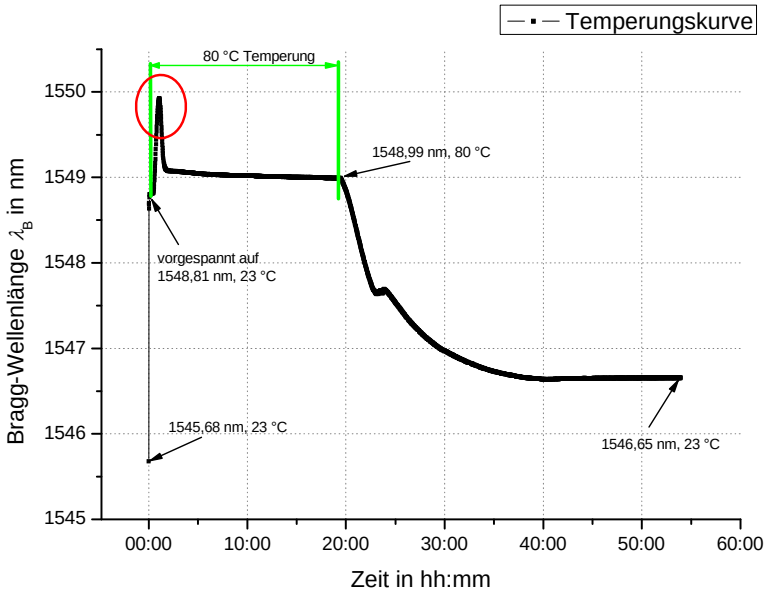


Abb. 56: Aushärtungsvorgang eines Patches. Die Bragg-Wellenlänge des FBG ist als Funktion der Zeit und der Temperatur dargestellt.

Der FBG-Dehnungssensor im Patch wurde bei Herstellung um ca. 3200 µm/m vorgespannt. Das Gewebe wurde mit Epoxidharz bei Raumtemperatur (23 °C) laminiert. Danach musste das Patch bei 80 °C ausgehärtet werden. In Abb. 56 ist zu erkennen, dass die Bragg-Wellenlänge des Sensors mit steigender Temperatur zunahm, denn das Patch nahm die eingestellte Temperatur des Ofens an. Mit einem roten Kreis ist in Abb. 56 die maximale Bragg-Wellenlänge gekennzeichnet. Obwohl die Temperatur des Ofens konstant gehalten wurde, fiel die Bragg-Wellenlänge in diesem Bereich stark ab. Dieses Verhalten entspricht dem Reaktionsschwinden und führt zu einem teilweisen Verlust der Vorspannung. Danach blieb die Bragg-Wellenlänge bei 1549 nm und einer Temperatur von 80 °C annähernd konstant. Das bedeutet, dass hier die Vernetzung des Harzes nahezu vollständig abgeschlossen worden war. Nach einer Temperung von 20 Stunden wurde der Ofen abgestellt und dieser kühlte langsam ab. In Abb. 56 ist zu erkennen, dass durch die thermische Längenänderung während des Abkühlens des Patches ein weiteres Schrumpfen stattfand, bis bei einer Temperatur von 23 °C die Bragg-Wellenlänge einen Wert von 1546,65 nm erreichte. Damit ist deutlich ersichtlich, dass der FBG-Dehnungssensor bei dieser Patchkonstruktion mindestens um 3000 µm/m vorgespannt werden muss, um eine Vorspannung von 1000 µm/m zu erhalten, da das Schrumpfen des Patchmaterials einen großen Teil der Vorspannung zurücknimmt. Versuche mit nicht vorgespannten FBG-

Dehnungssensoren im Patch zeigten, dass diese durch den Aushärtungsprozess sogar bis zu 4000 µm/m im Druckbereich beansprucht wurden.

Bei Belastungsversuchen mit den Patches wurde festgestellt, dass Kriechvorgänge stattfinden. Dabei verschob sich die Bezugs-Bragg-Wellenlänge der Patches je nach Konstruktionsart teilweise um bis zu 600 pm bezogen auf einen Zeitraum von 2 h und einer Belastung von 6000 µm/m Dehnung. Beispielhaft für die beobachteten Kriechvorgänge ist in Abb. 57 ein Belastungsverlauf für eine Patch-Konstruktionsvariante dargestellt.

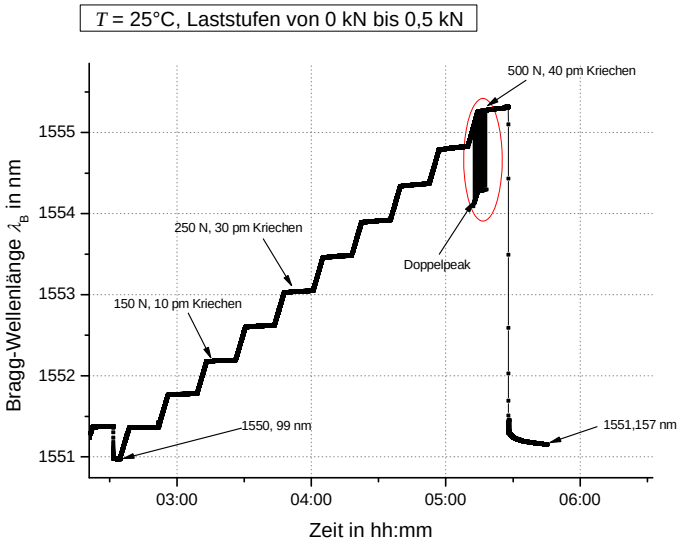


Abb. 57: Änderung der Bragg-Wellenlänge über der Zeit bei 10 Belastungsstufen á 50 N. Die Bezugs-Bragg-Wellenlänge ohne Belastung beträgt 1550,99 nm. Nach der Belastung hat sich die Bezugs-Bragg-Wellenlänge auf 1551,157 nm erhöht.

Die Kraftstufen wurden jeweils 15 min gehalten. Deutlich ist zu erkennen, wie sich bei konstanter Belastung die Bragg-Wellenlänge des Patches in den einzelnen Stufen veränderte. Bei einer Belastung von 0,5 kN kriecht das Patch bereits um 40 pm. In dem in Abb. 57 rot eingekreisten Bereich findet ein deutlicher Sprung in der Bragg-Wellenlänge zu einer zweiten Wellenlänge statt, die zusätzlich aufgrund der Störung des reflektierten Spektrums entsteht. Das reflektierte Spektrum hat sich mit zunehmender Belastung derart verändert, dass ein Nebenmaximum stark angestiegen ist. Der Auswertealgorithmus der Bragg-Wellenlänge interpretiert dabei teilweise dieses Nebenmaximum als eigentliche Bragg-Wellenlänge, was zu Fehlern in der Analyse des Spektrums führt. Dieses Phänomen tritt aufgrund der ungünstigen Einbettung des FBG im Patch auf. Offenbar wurden durch den Herstellungsprozess des Patches bereits Mikrobiegungen und große Querkräfte in die optische Faser eingetragen. Durch eine Änderung der Patchkonstruktion konnte dieses Verhalten verbessert werden. Dabei wurden zwei

Patchhälften, zwischen denen der FBG-Dehnungssensor integriert wurde, zuerst komplett vorgefertigt und getempert. Danach wurden die beiden Hälften mit dem dazwischen platzierten FBG-Dehnungssensor verklebt. In Abb. 58 ist die Änderung der Bragg-Wellenlänge von der Belastung dieses Patches bei 23 °C dargestellt. Es ist zu erkennen, dass nach mehreren Prüfzyklen mit dem auf diese Weise konstruierten Patch die Bezugs-Bragg-Wellenlänge konstant blieb und die Wellenlängenänderung zur Berechnung der Dehnung eine Messunsicherheit von ± 0,15 mm/m aufweist.

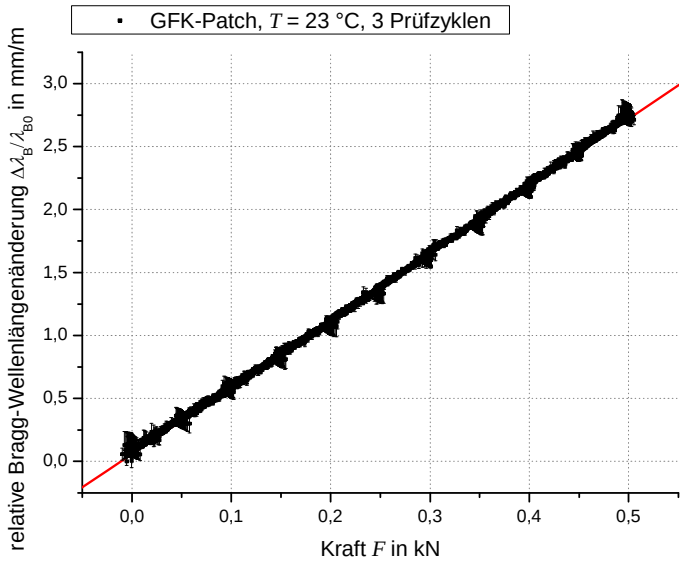


Abb. 58: Änderung der Bragg-Wellenlänge über der aufgebrachten Kraft eines aus zwei vorgefertigten Hälften bestehenden Patches.

Diese Patchkonstruktion aus zwei vorgefertigten Patchhälften, in denen das vorgespannte FBG verklebt wurde, zeigte deutliche Verbesserungen gegenüber den zuvor entwickelten Patchvarianten. Die hohe Messunsicherheit von 150 µm/m allerdings genügte den Anforderungen der Rotorblattentwickler für eine präzise Messung der Dehnungen in den Rotorblättern nicht. Zur Verbesserung der Messunsicherheit und um das Patch geometrisch kleiner, aber gleichzeitig robuster zu machen, bedarf es an dieser Stelle einer langfristigen Fortführung der hier entwickelten Patches und Herstellungswerkzeuge.

In Abb. 59 ist die Bragg-Wellenlängenänderung des weiterentwickelten FBG-Patches im Verhältnis zur Dehnung einer Zugprobe, auf der das Patch appliziert wurde, dargestellt. Die Dehnung der Zugprobe wurde mit DMS bestimmt. Aus diesen Daten lässt sich der Dehnungsübertragungskoeffizient für diese Art von Patches zu K_ε = 0,85 bestimmen, was einer Wellenlängenempfindlichkeit von 1,32 pm/µm/m entspricht.

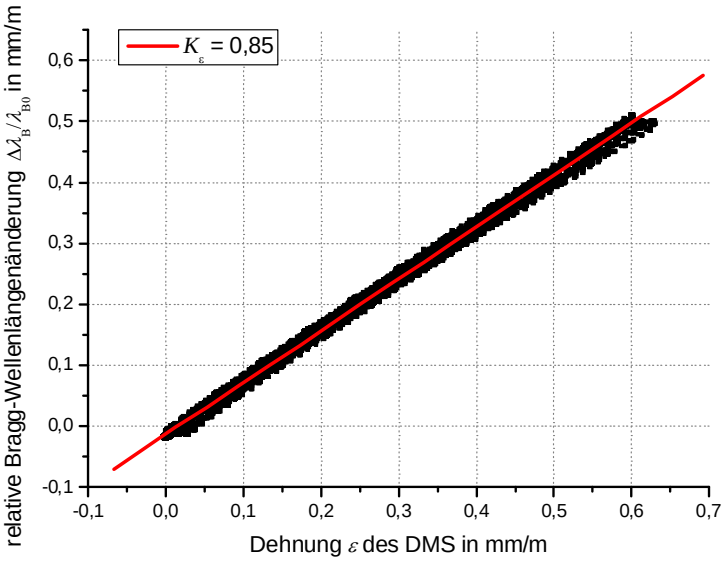


Abb. 59: Bestimmung des Dehnungsübertragungskoeffizienten K_ε = 0,85 für ein FBG-Patch aus der Änderung der Bragg-Wellenlänge gegenüber der Dehnungsänderung des Messobjekts gemessen mit DMS.

Durch eine fundierte und langfristig angelegte Weiterentwicklung und Optimierung der Patches können die hier noch ausstehenden Fragestellungen gelöst werden. Um das Anwendungsgebiet der Patches zusätzlich zu erweitern, sind Patchvarianten, die mehrdimensionale Dehnungen erfassen (Rosetten), als zukünftige Entwicklungen denkbar und z.T. bereits realisiert worden [Sta04].

IV.3 Integrationsbeispiel für FBG-Dehnungssensoren

Innerhalb des Verbundprojekts „IMO-Wind“ der BAM waren in ein Stellvertreter-Rotorblatt faseroptische Sensoren zur Charakterisierung des Langzeitverhaltens der eingesetzten Faserverbundwerkstoffe zu integrieren. Aus Sicht der faseroptischen Sensorik lag der Bearbeitungsschwerpunkt auf der Erarbeitung einer Integrationstechnik für die FBG-Dehnungssensoren, so dass diese im Herstellungsprozess des Rotorblattes nicht zerstört wurden, einen guten Haftungsverbund mit dem umgebenden Material eingingen und damit langzeitstabile und zuverlässige Messdaten liefern. Da zum Zeitpunkt der Integration die oberflächenapplizierten Patches aufgrund der Patchdicke von 1 mm und den noch auftretenden Kriecheffekten nicht in Frage kamen, wurde ein Integrationskonzept, angepasst an die Anforderungen der Rotorblatthersteller, entwickelt. Der erwartete Dehnungsbereich des Stellvertreter-Rotorblattes betrug ± 2 mm/m. Eine Vorspannung von 3 mm/m musste auf die einzelnen Sensoren aufgebracht werden, damit eine Druckbelastung der optischen Faser in Achsrichtung vermieden wurde. Bei einer leicht konkaven bzw. konvexen Form der beiden Rotorblatt-Halbschalen war ein Vorspannen einer Glasfaser mit einer Kette von FBG-Dehnungssensoren, ein sogenanntes FBG-Array, über eine Länge von 8 m nicht möglich. Die FBG-Dehnungssensoren mussten also so konzipiert sein, dass die Arrays stückweise vorgespannt werden konnten. Robustheit gegenüber der Aushärtetemperatur und Stabilität gegenüber den noch aufzutragenden GFK-Gewebeschichten mussten beachtet werden.

Die Messwerte der integrierten FBG-Dehnungssensoren wurden von den Projektpartnern des „IMO-Wind-Projekts" zur Spannungsanalyse des Rotorblatts unter Wechselbiegung genutzt.

Die hier entwickelte Integrationstechnik für die FBG-Dehnungssensoren in den Arrays ermöglichte das stückweise Aufbringen der hohen Vorspannungen auf jeden einzelnen Sensor. Die kritische Dicke der zu integrierenden Sensoren wurde mit 0,8 mm nicht überschritten. Diese Anforderung wurde an die einzubettenden Sensoren gestellt, da es sonst zu Delaminationen oder Fehlstellen innerhalb des Laminats durch die Einbettung dicker Sensoren kommen könnte. Während der Herstellung des Rotorblattes wurde nach Vorgabe der Konstrukteure jeweils auf der Saug- und auf der Druckseite des Blattes in den Gurtkanälen der beiden Stege je eine Sensorkette mit vier FBG-Dehnungssensoren integriert. Der Abstand zwischen den FBG-Dehnungssensoren betrug 2 m, wobei die Position der Sensoren durch die Konstrukteure vorgegeben wurde. Während der Integration wurden die Arrays noch durch eine zusätzliche Epoxidharzschicht geschützt, so dass die Arrays durch das folgende Auftragen weiterer GFK-Schichten nicht beschädigt wurden. Die Anschlüsse der Sensoren wurden geschützt aus dem

Faserverbundwerkstoff zu zwei Anschlussboxen heraus geführt, die nach der Fertigstellung des Rotorblattes auf die Innenseite von Druck- und Saugseite laminiert wurden. Nach der Fertigstellung des Rotorblattes wurde festgestellt, dass alle verfügbaren Sensoren die aufgebrachte Vorspannung gehalten haben. Alle Sensoren konnten erfolgreich in das Rotorblatt integriert und deren verfügbare Messwerte zur weiteren Analyse des Materialverhaltens herangezogen werden. Während der Lagerungszeit des Rotorblattes (ca. 1,5 Jahre), bis zum Beginn der Versuche wurden keine Kriecheffekte im Messsignal der Sensoren festgestellt. Es konnte damit gezeigt werden, dass die hier entwickelte Integrationstechnik für FBG-Dehnungssensoren erfolgreich eingesetzt wurde. Die ausstehenden Belastungsversuche werden nun zeigen, ob die FBG-Dehnungssensoren nach der Integration langzeitstabile Messwerte liefern.

Abb. 60 zeigt einen Blick in das fertig gestellte Rotorblatt am Nabenanschluss. Zu erkennen sind die Anschlussboxen der integrierten FBG-Dehnungssensoren für die Verkabelung mit dem Messgerät. Unterhalb der Stege sind die FBG-Dehnungssensoren in den Gurtkanälen integriert.

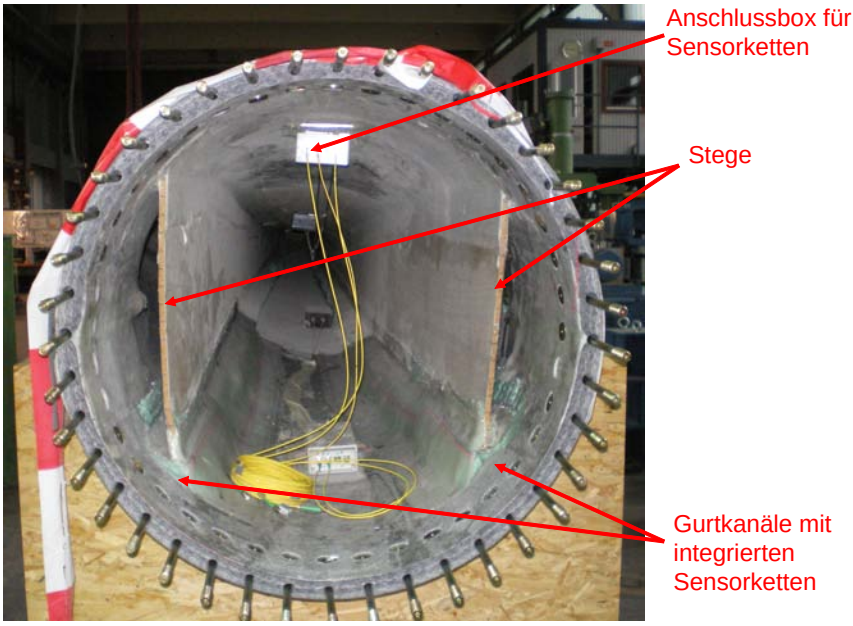


Abb. 60: Blick auf die Innenseiten des Stellvertreter-Rotorblatts mit den Anschlussboxen der Sensorketten. Die Sensorketten sind in den vier Gurtkanälen integriert, auf denen die beiden Stege aufgeklebt wurden.

Das komplett fertig gestellte Rotorblatt ist in Abb. 61 dargestellt. In dieser Darstellung ist auch ein Teil der mechanischen Prüfvorrichtung erkennbar, in die das Rotorblatt eingespannt wurde.

Abb. 61: Gesamtansicht auf das Rotorblatt, das bereits für die Belastungsversuche in einer Prüfvorrichtung eingespannt wurde. Standort: Testlabor der BAM, Abteilung Bauwerkssicherheit.

IV.4 Weiterführende Untersuchungen

Die Optimierung der hier vorgestellten Patches zur Minimierung der Messunsicherheiten ist aufbauend auf den hier erlangten Erkenntnissen weiter zu verfolgen. Für eine reproduzierbare Herstellung der Patches muss von der zurzeit manuellen Fertigung zu einer halbautomatisierten Fertigung übergegangen werden. Dies beinhaltet auch eine Weiterentwicklung der für die Patchherstellung notwendigen Werkzeuge. Die Langzeitstabilität und die Dehnungsgrenzen der Patches müssen in weiteren Studien untersucht und experimentell ermittelt werden.

Neben der Weiterentwicklung der hier beschriebenen Patches und der KALFOS-Anlage ist durch Validierung ein experimenteller Vergleich mit kommerziell erhältlichen Patches möglich. Neben einem Vergleich von Temperatur- und Dehnungsübertragungskoeffizienten ist auch eine Untersuchung des spektralen Antwortsignals der hier beschriebenen Patches und der kommerziell erhältlichen Patches im Vergleich wichtig. Durch geeignete Modifikationen von Probekörpern und Belastungseinrichtungen wäre auch der Einfluss von Querkräften auf die Patches messbar und kann in späteren Untersuchungen mit KALFOS bestimmt werden.

Eine weitere Herausforderung ist der Einsatz von Patches bei Bauteilen mit nicht bekannten Hauptspannungsrichtungen. Dafür müssen die FBG-Sensoren in Form von Rosetten in ein Patch integriert werden. Der Fokus der Entwicklung liegt hierbei auf der kompakten Bauform des Rosetten-Patchs, um auch dünne und kleine GFK-Strukturen überwachen zu können.

V Empfehlung zur Applizierung mit optimaler Dehnungsübertragung

Um eine optimale Dehnungsübertragung zwischen dem FBG-Dehnungssensor in Form eines Patches oder als optische Faser und dem Messobjekt zu erzielen, ist eine gründliche Oberflächenvorbehandlung zwingend erforderlich. Die Auswahl des richtigen Klebstoffs, angepasst an die Temperatur- und Umgebungsbedingungen und ausgelegt für die geforderte Lebensdauer des FBG-Dehnungssensors, ist von prinzipieller Bedeutung für eine gute Dehnungsübertragung. An dieser Stelle kann keine globale Empfehlung für eine bestimmte Applizierungsart bzw. einen bestimmten Klebstoff gegeben werden, da dies individuell von der Messstelle und den Anforderungen an das Sensorsystem abhängig ist. Dementsprechend muss der Dehnungsübertragungskoeffizient individuell für die einzelne Messstellenkonfiguration bestimmt werden. Dies kann anhand von Kalibrierdiagrammen, wie sie in dieser Arbeit beschrieben worden sind, durchgeführt oder an dem KALFOS-Messplatz ermittelt werden.

In der unter Mitwirkung der Autorin veröffentlichten Richtlinie [VDI60] für FBG-basierte Dehnungssensoren sind die für eine korrekte Anwendung der Sensoren und für eine korrekte Angabe der Sensorkennwerte wichtigen Parameter und Nutzungshinweise sowohl für Hersteller als auch Anwender dargestellt. Das Ziel der Richtlinie ist eine klare Spezifizierung der kommerziell erhältlichen FBG-Dehnungssensoren und des Umgangs mit deren Messaussagen. Die Richtlinie bietet einen Überblick über die vom Hersteller zu prüfenden Kenngrößen und der im Datenblatt darzustellenden, notwendigen Angaben. Für den Anwender von FBG-Dehnungssensoren ermöglicht sie somit den direkten Vergleich zwischen den unterschiedlichen auf dem Markt angebotenen Produkten.

Mit dem hier aufgebauten Validierungsmessplatz sind eine Bewertung der Dehnungsübertragung und eine Entwicklung verschiedener Applizierungsmethoden für angepasste Oberflächenapplizierungen möglich. Eine Empfehlung für die optimale Applizierung – und somit die optimale Dehnungsübertragung – in Abhängigkeit von den Messbedingungen kann mit dieser Prüfeinrichtung für den jeweiligen Einzelfall ausgesprochen werden.

VI Zusammenfassung und Ausblick

In einem gemeinsamen Projekt mit dem Forschungszentrum EADS Innovation Works (IW) in Ottobrunn ist eine Messmethodik zur Bewertung des Dehnungsübertragungsverhaltens von oberflächenapplizierten FBG-Dehnungssensoren entwickelt worden. Die Arbeit beinhaltete zunächst die Erfassung möglicher Einflussparameter auf die Dehnungsübertragung von FBG-Sensoren sowie die Charakterisierung des Dehnungsübertragungskoeffizienten in Abhängigkeit der verschiedenen Klebstoffe und Coatings der optischen Faser unter Temperatur-, Feuchte- und mechanischer Beanspruchung der Messobjekte. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabellenform (im Anhang) dargestellt. Eine gute Dehnungsübertragung zeigte sich bei FBG-Dehnungssensoren, die mit Ormocer® gecoatet oder ungecoatet waren. Bei diesen Varianten konnten für die eingesetzten Klebstoffe besonders hohe Dehnungsübertragungskoeffizienten erzielt werden. FBG-Dehnungssensoren mit Acrylat-Coating, das im Vergleich zum Ormocer® eine dicke Schicht darstellt und ein stark elastisches Materialverhalten zeigt, haben erwartungsgemäß eher niedrige Dehnungsübertragungskoeffizienten erzielt. Zudem sind optische Fasern mit Acrylat-Coating nur in einem begrenzten Temperaturbereich einsetzbar. Eine Optimierung des Coatings der FBG-Dehnungssensoren ist eine sinnvolle Aufgabe in weiterführenden Untersuchungen, um die Dehnungsübertragung vom Messobjekt zum Sensor zu verbessern. Eine Bewertung der Haftung zwischen Cladding und Coating der optischen Faser ist ebenso ein wichtiger Faktor und muss in eingehenden Studien weiter untersucht werden.

Es konnte gezeigt werden, dass der Dehnungsübertragungskoeffizient bei einigen Klebstoffen stark temperaturabhängig ist. Fällt die Wahl auf einen Klebstoff, dessen mechanische Parameter sich mit der Temperatur ändern, so ist für die Bestimmung der Dehnungsübertragung die Nutzung eines Kalibrierdiagramms von großer Bedeutung. Die Aufnahme zusätzlicher Kalibrierdiagramme ist für die weitere anwendungsorientierte Nutzung der FBG-Dehnungssensoren sinnvoll. Insbesondere bei Messungen, bei denen die präzise Bestimmung der Bauteildehnung unabdingbar ist, muss sichergestellt sein, dass der korrekte Dehnungsübertragungskoeffizient für die Dehnungsberechnung aus der Wellenlängenänderung des Sensors verwendet wird

Die Charakterisierung der Klebstoffe in ihrem mechanischen und thermischen Verhalten ist aufgrund der Abhängigkeit der Dehnungsübertragung von den mechanischen Parametern der Klebstoffe ein wichtiger Teil dieser Arbeit. Es konnte gezeigt werden, dass eine genaue Kenntnis des Aushärtungsverhalten des Klebstoffsystems wichtig ist und der Aushärtezustand analysiert werden muss, da sonst unter Umständen der Anwender nicht erkennt, dass das Sys-

tem nicht richtig chemisch ausgehärtet, sondern nur fest geworden ist und sich allmählich mit fortschreitender Zeit verändern kann.

Die Auswirkung von Feuchte auf bestimmte Coatings der FBG-Dehnungssensoren konnte gezeigt werden. Umfassendere Untersuchungen zu diesem Themengebiet sind notwendig und stehen noch aus.

Mit diesen hier dargestellten Erkenntnissen wurde zur Bewertung der Dehnungsübertragung schließlich eine Messmethodik entwickelt, die ein messtechnologisch unabhängiges optisches Referenzverfahren nutzt. Dieses erlaubt, die Verformung des Dehnungssensors, des Klebstoffs und des Messobjekts unter kombinierten Temperatur- und Belastungsbedingungen zu erfassen. Diese Messdaten werden dann in Relation zur Änderung der Bragg-Wellenlänge des Dehnungssensors gesetzt und daraus der Dehnungsübertragungskoeffizient bestimmt. Die Funktionsfähigkeit des Messplatzes mit dem ESPI-System als Referenzverfahren konnte nachgewiesen werden. Mit der 3D-Stereokorrelation konnten ebenfalls alle notwendigen Untersuchungen zur Referenzierung der Dehnungen durchgeführt werden. Der wesentliche Vorteil dieser beiden Methoden liegt in der hochauflösenden Messtechnik und der Bewertung von relativen Bewegungen zwischen Sensor und Messobjekt. Verluste in der Dehnungsübertragung können direkt den einzelnen beteiligten Elementen (Sensor, Klebstoff, Messobjekt) zugeordnet werden. Nur ein optisches Referenzverfahren bietet diese Möglichkeit, schnell visuell eine Bewertung der Dehnungsübertragung an der Messstelle selbst vornehmen zu können. Zur Validierung der faseroptischen Sensoren können jedoch nicht beliebige Bauteile in die Belastungseinrichtung eingespannt werden. Eine Entwicklung eines tragbaren Messplatzes bzw. einer Messmethodik zur Online-Prüfung der Dehnungsübertragung auf Sensoren an komplexen und sehr großen Bauteilgruppen (beispielsweise Rumpfstrukturen eines Flugzeugs) kann in Zukunft angedacht und Konzepte sollten entwickelt werden.

Ein weiterer Teil dieser Arbeit betraf den Aufbau des Messplatzes. Die Funktionsfähigkeit des Messplatzes und der Messmethode konnte nachgewiesen werden. Der Messplatz muss jedoch noch für kommerzielle Validierungsarbeiten weiterführend charakterisiert werden und eine Standardarbeitsanweisung erstellt werden. Für die Beurteilung der Dehnungsübertragung und dem Ausbau der Messmethodik stehen noch Dehnungsmessungen an Messobjekten unter Temperaturbelastung mit der 3D-Stereokorrelation und dem ESPI-System aus. Für die kombinierten Temperatur- und Lastbeanspruchungen wird zurzeit ein Kalibrierkörper für die 3D-Stereokorrelation entwickelt. Vergleichende Untersuchungen beider Referenzverfahren sind ebenfalls Bestandteil weiterführender Arbeiten. Zudem muss der Messplatz noch durch Verfahren zur Beurteilung des spektral-optischen Antwortsignals ergänzt und ausgebaut werden. Hin-

sichtlich der Kalibrierung von FBG-Dehnungssensoren muss ein entsprechendes Verfahren entwickelt werden, das auch die Rückführbarkeit der Messgrößen ermöglicht.

Im Zusammenhang mit dem Verbundprojekt „IMO Wind“ sind für praktische Dehnungsmessungen unter spezifischen Bedingungen an einem Rotorblatt einer Windkraftanlage FBG-Patches entwickelt worden. Die Funktionsfähigkeit der Patches konnte durch Weiterentwicklung des konstruktiven Aufbaus stetig verbessert werden. Untersuchungen der Patches im Vergleich zu kommerziell erhältlichen Patches stehen noch aus. Entsprechend der Untersuchungsergebnisse können die hier entwickelten Patches auch an spezifische Messbedingungen angepasst und weiter verbessert werden. In diesem Zusammenhang konnte eine beispielhafte Integration von FBG-Dehnungssensoren gezeigt und deren Funktionsfähigkeit nachgewiesen werden. Die ausstehenden Belastungsversuche zur Beurteilung des Materialverhaltens auf Basis der gewonnen Sensordaten werden zurzeit durchgeführt. Tiefergehende Fragestellungen zur Integration von faseroptischen Dehnungsensoren müssen in weiteren Forschungsprojekten behandelt werden.

Um einen größeren Anwenderkreis zu erreichen, ist eine Standardisierung der FBG-Dehnungssensoren nach bestimmten Kriterien notwendig. Die hier entwickelte Messmethodik und der hier aufgebaute Messplatz bilden die experimentelle Grundlage zur Bewertung der Funktionsfähigkeit der FBG-Dehnungssensoren und ihrer Einsetzbarkeit für bestimmte Messaufgaben. Durch diese Bewertung ist eine Basis für die Vergleichbarkeit von kommerziell erhältlichen wie auch in der Entwicklung befindlichen FBG-Dehnungssensoren möglich. Die Entwicklung neuer Applizierungstechniken kann gefördert und optimiert werden. Damit ist der Grundstein für die Bewertung der Zuverlässigkeit dieser Messtechnik gelegt, die für die Anwendung in sicherheitsrelevanten Industriebereichen von prinzipieller Bedeutung ist.

VII Literaturverzeichnis

[Abe06] Abe, I., Frazão, O., Schiller, M.W., Nogueira, R.N., Kalinowski, H.J., Pinto, J.L., Bragg gratings in normal and reduced diameter high birefringence fibre optics, Journal of Measurement, Science and Technology, Vol.17, pp. 1477-1484, 2006

[Ans98] Ansari, F., Libo, Y., Mechanics of Bond and Interface Shear Transfer in Optical Fiber Sensors, Journal of Engineering Mechanics, pp. 385-394, 1998

[Ara09] ARAMIS Benutzerhandbuch - Software ARAMIS v6.1 und höher, 2009

[AST25] ASTM E 251-92 „Standard Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages"

[Bro05] Brockmann, W., Geiß, P.L., Klingen, J., Schröder, B., Klebtechnik, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2005

[Che05] Cheng, Ch.-Ch., Lo, Y.-L., Pun, B.S., Chang, Y.M., Li, W.Y., An Investigation of Bonding-Layer Characteristics of Substrate-Bonded Fiber Bragg Grating, Journal of Lightwave Technology, Vol. 23, 11, pp. 3907-3915, 2005

[Cor07] Corres, J.M., Arregui, F.J., Matias, I.R., Sensitivity optimization of tapered optical fiber humidity sensors by means of tuning the thickness of nanostructured sensitive coatings, Journal of Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 122, pp. 442-449, 2007

[DAR96] DAR ATF/27/96 „Validierung im Prüfwesen – Empfehlung für Prüflaboratorien und Begutachter"

[DE51] Deutsches Patentamt- und Markenamt, Offenlegungsschrift DE 10 2005 030 751 A1

[DIN05] DIN EN ISO/IEC 17025:2005 „Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien"

[DIN55] DIN 54455 „Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen – Torsionsscher-Versuch"

[DIN56] DIN 54456 „Prüfung von Konstruktionsklebstoffen und -klebungen – Klimabeständigkeitsversuch"

[DIN69] DIN EN 14869-2 „Strukturklebstoffe – Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen – Teil 2: Scherprüfung für dicke Fügeteile"

[DIN77] DIN EN ISO 14577-1 „Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter – Teil 1: Prüfverfahren"

[Duc99] Duck, G., Renaud, G., Measures, R., The mechanical load transfer into a distributed optical fiber sensor due to a linear strain gradient: embedded and surface bonded cases, Journal of Smart Materials and Structures, Vol.8, pp. 175-181, 1999

[Ehr99] Ehrenstein, G., Polymer-Werkstoffe, Hanser Fachbuch Verlag, 1999

[End80] Endlich, O.W., Funktionsgerechte Gestaltung von Fügeverbindungen mit Kleb- und Dichtstoffen, Adhäsion, 11, pp. 378-382, 1980

[EP97] Europäisches Patentamt, Offenlegungsschrift EP 1 679 497 A1

[Fau77] Fauner, G., Endlich, W., Klebverbindungen berechnen aber wie?, KEM, pp. 44-50, 1977

[Flo04] Flockhart, G., Maier, M., Barton, J., MacPherson, W., Jones, J., Chisholm, K., Zhan, L., Bennion, I., Read, I., Foote, P., Quadratic behaviour of fiber Bragg grating temperature coefficients, Journal of Applied Optics, Vol. 43 (13), pp. 2744-2751, 2004

[Gaf00] Gafsi, R., El-Sherif, M.A., Analysis of Induced-Birefringence Effects on Fiber Bragg Gratings, Journal of Optical Fiber Technology, Vol. 6, pp. 299-323, 2000

[Hab03] Habel, W.R., Faseroptische Sensoren für hochaufgelöste Verformungsmessungen in der Zementsteinmatrix, BAM Forschungsbericht Nr. 246, Wirtschaftsverlag NW, Berlin, 2003

[Har98] Haran, F., Rew, J., Foote, P., A strain-isolated fibre Bragg grating sensor for temperature and compensation of fibre Bragg grating strain sensors, Journal of Measurement, Science and Technology, Vol. 9, pp. 1163-1166, 1998

[Hau02] Haufe, M., Methoden zur Verbesserung der Adhäsion an metallischen Oberflächen, Dissertation, Universität Bielefeld, 2002

[Hof08] Hoffmann, L., Spektroskopische Instrumente zur Demodulation von Faser-Bragg-Gitter-Signalen, Dissertation, TU München, 2008

[Hof87] Hoffmann, K., Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen, Hottinger Baldwin Messtechnik, Darmstadt, 1987

[Hua03] Huang, Y., Li, J., Kai, G., Yuan, S., Dong, X., Temperature compensation package for fiber Bragg gratings, Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 39 (1), pp. 70-72, 2003

[IMO] http://www.bam.de/de/microsites/imo_wind/index.htm, Januar 2007

[ISO08] ISO/IEC Guide 98-3:2008 „Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in the expression of measurement"

[Jah01] Jahns, J., Photonik - Grundlagen, Komponenten und Systeme, Oldenbourg Verlag, München, 2001

[Jen07] Jenkac, J., Messung des Einflusses von Transversalkräften auf optische Faser-Bragg-Gitter: Charakterisierung der optischen Reflexionsspektren von Faser-Bragg-Gitter, Diplomarbeit, FH München, 2007

[Keh03] Kehlenbach, M., Integrierte Sensorik zur Schädigungserkennung in Faserverbundstrukturen für die Luftfahrt, Dissertation, TU Darmstadt, 2003

[Kei95] Keil, S., Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmeßstreifen, Cuneus Verlag, Zwingenberg, 1995

[Kre] Kreuzer, M., Dehnungsmessung mit Faser-Bragg-Gitter-Sensoren, HBM Darmstadt

[Li05] Li, J., Zhou, Z., Ou, J., Interface strain transfer mechanism and error modification for adhered FBG strain sensor, Proceedings of SPIE, 5851, pp. 278-287, 2005

[Lup05] Lupi, C., Felli, F., Ippoliti, L., Caponero, M.A., Ciotti, M., Nardelli, V., Paolozzi, A., Metal coating for enhancing the sensitivity of fibre Bragg grating sensors at cryogenic temperature, Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 14, pp. N71-N76, 2005

[Mic69] Michel, M., Adhäsion und Klebtechnik, Carl Hanser Verlag, München, 1969

[NTak07] Takeda, N., Okabe, Y., Mizutani, T., Damage detection in composites using optical fibre sensors, Proceedings IMechE, Vol. 221 Part G, pp. 497-508, 2007

[Oh04] Oh, S.T., Han, W.T., Paek, U.C., Chung, Y., Discrimination of temperature and strain with a single FBG based on the birefringence effect, Optics Express, Vol.12 (4), pp.724-729, 2004

[Oka02] Okabe, Y., Tanaka, N., Takeda, N., Effect of fiber coating on crack detection in carbon fiber reinforced plastic composites using fiber Bragg grating sensors, Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 11, pp. 892-898, 2002

[Oth99] Othonos, A., Kalli, K., Fiber Bragg Gratings, Fundamentals and Application in Telecommunications and Sensing, Artech House, Boston, 1999

[Per84] Perry, C.C., The Resistance Strain Gage Revisited, Experimental Mechanics, Vol. 24 (4), pp. 286-299, 1984

[Ric04] Richter, D., Oberflächencharakterisierung von aliaphatischen Polyamiden zur Bewertung adhäsiver Wechselwirkungen in Carbonfaserverbunden, Dissertation, TU Berlin, 2004

[Rin08] Rindorf, L., Band, O., Sensitivity of photonic crystal fiber grating sensors: biosensing, refractive index, strain, and temperature sensing, Journal of Optical Society of America B, Vol. 25 (3), pp. 310-324, 2008

[Roh59] Rohrbach, C., Czaika, N., Deutung des Mechanismus der Dehnungsmeßstreifen und seiner wichtigsten Eigenschaften an Hand eines Modells, Materialprüfung, Band 1 (4), pp. 121-156, 1959

[Roh61] Rohrbach, C., Czaika, N., Über das Dauerschwingverhalten von Dehnungsmeßstreifen, Materialprüfung, Band 3 (4), pp. 125-168, 1961

[Roh89] Rohrbach, C., Handbuch der Experimentellen Spannungsanalyse, VDI Verlag, Düsseldorf, 1989

[Rot08] Roths, J., Kratzer, P., Vergleich zwischen optischen Faser-Bragg-Gitter-Dehnungssensoren und elektrischen Dehnungsmessstreifen, Technisches Messen, Vol. 75 (12), pp. 647- 654, 2008

[Sch04] Schlimmer, M., Berechnung und Auslegung von Klebverbindungen (Teil 9), Adhäsion 3.05, pp. 44-48, 2004

[Sch08] Schallert, M., Hofmann, D., Habel, W.R., Strukturanalyse von Betonpfählen durch eingebettete faseroptische Sensoren, Technisches Messen, Vol. 75 (9), pp. 485-500, 2008

[Sir90] Sirkis, J.S., Haslach, H.W., Interferometric Strain Measurement by Arbitrarily Configured, Surface-Mounted, Optical Fibers, Journal of Lightwave Technology, Vol. 8 (10), pp. 1497-1503, 1990 (mit Experiment)

[Sta04] Staszewski, W., Boller, Ch., Tomlinson, G., Health Monitoring of Aerospace Structures – Smart Sensor Technologies and Signal Processing, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, UK, 2004

[Ste05] Stelter, M., Untersuchung des Dehnungsübertragungsverhaltens geklebter faseroptischer Sensoren, Diplomarbeit, FHTW Berlin, 2005

[Ste72] Stehlin, P., Strain distribution in and around strain gauges, Journal of Strain Analysis, Vol. 7 (3), pp. 228-235, 1972

[Ste97] Steenkiste, R., Springer, G., Strain and Temperature Measurement with Fiber Optic Sensors, Technomic Publishing, Basel, 1997

[Sto00] Stockmann, M., Mikromechanische Analyse der Wirkungsmechanismen elektrischer Dehnungsmessstreifen, Habilitationsschrift, TU Chemnitz, 2000

[STak07] Takeda, S., Aoki, Y., Ishikawa, T., Takeda, N., Kikukawa, H., Structural health monitoring of composite wing structure during durability test, Composites Science and Technology, Vol. 67, pp. 286-295, 2007

[Tan03] Tanaka, N., Okabe, Y., Takeda, N., Temperature-compensated strain measurement using fiber Bragg grating sensors embedded in composite laminates, Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 12, pp. 940-946, 2003

[Tru01] Trutzel, M.N., Dehnungsermittlung mit faseroptischen Bragg-Gitter-Sensoren, Dissertation, TU Berlin, 2001

[US76] United States Patent US 2002/0092976 A1

[Ven08] Venugopalan, T., Sun, T., Grattan, K.T.V., Long period grating-based humidity sensor for potential structural health monitoring, Journal of Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 148, pp. 57-62, 2008

[VDI35] VDI/VDE/GESA 2635 Blatt 1 „Dehnungsmessstreifen mit metallischem Messgitter – Kenngrößen und Prüfbedingungen“

[VDI60] VDI/VDE/GESA 2660 „Optischer Dehnungssensor basierend auf Faser-Bragg-Gitter“

[Wen05] Wenzel, M., Spannungsbildung und Relaxationsverhalten bei der Aushärtung von Epoxidharzen, TU Darmstadt, 2005

[Wu82] Wu, S., Polymer Interface and Adhesion, Marcel Dekker Inc., New York, 1982

[Xie07] Xie, J., Zhang, H., Zhu, Z., Xu, J., Hu, R., Song, L., A study of the temperature sensitivity of fiber Bragg gratings after metallization, Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 16, pp. 1837-1842, 2007

[Ye02] Ye, C. Staines, S., James, S.W., Tatam, R.P., A polarization-maintaining fibre Bragg grating interrogation system for multi-axis strain sensing, Measurement, Science and Technology, Vol. 13, pp. 1446-1449, 2002

[Zha04] Zhao, J., Zhang, X., Huang, Y., Ren, X., Experimental analysis of birefringence effects on fiber Bragg gratings induced by lateral compression, Journal of Optics Communications, Vol. 229, pp. 203-207, 2004

[Zeh04] Zeh, T., Optical Fiber Bragg Sensors – Measurement Systems and Signal Processing, Dissertation, TU München, 2004

VIII Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Dehnungsübertragungsmodell nach Rohrbach und Czaika [Roh59]. Im oberen Teil der Abbildung ist ein aufgeklebter DMS mit seiner aktiven Gitterlänge im Schnitt A-A dargestellt. Darunter sind schematisch die Verhältnisse der Dehnungen zwischen Bauteil und Trägermaterial, $\varepsilon_T / \varepsilon_B$, und Bauteil und Messgitter, $\varepsilon_M / \varepsilon_B$, mit den entsprechenden Übergangslängen $\ddot{U}_{BT}$ und $\ddot{U}_{TM}$ dargestellt. 6

Abb. 2: Schematischer Aufbau eines Lichtwellenleiters (Single-Mode-Glasfaser). Rechts ist der Brechungsindexverlauf bezogen auf den Radius r der Faser dargestellt. 10

Abb. 3: Schematische Darstellung der Einschreibung eines Faser-Bragg-Gitters durch Interferenz nach [Zeh04]. 11

Abb. 4: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Faser-Bragg-Gitters. 12

Abb. 5: Schematische Darstellung der Polarisationsänderung durch Deformation des Faserquerschnitts beim Lichtwellenleiter [Gaf00]. Die Feldlinien der elektrischen Feldstärke sind zur Anschauung übertrieben gekrümmt dargestellt. 16

Abb. 6: Gemessenes Reflexionsspektrum eines entlang der Faser belasteten FBG-Sensors. 17

Abb. 7: Gemessenes Reflexionsspektrum eines durch Querkraft belasteten FBG-Sensors. 17

Abb. 8: Haftungsverlust zwischen Cladding und Coating. 20

Abb. 9: Schematische Darstellung einer Messung mit einem OSA. 22

Abb. 10: Schematische Darstellung des Aufbaus eines FBG-Messgeräts (Quelle: Firma Micron Optics Inc.). 23

Abb. 11: Vereinfachte Darstellung einer applizierten optischen Faser auf einem Messobjekt (Substrat). Der Durchmesser der Faser ist mit d_F, die Klebstoffschichtdicke mit d_K und die Dicke des Substrats mit d_S bezeichnet. 26

Abb. 12: Darstellung von Modell A zur Berechnung der effektiven Klebstoffschichtdicke. 27

Abb. 13: Berechnung der effektiven Klebstoffschichtdicke nach Modell B mit Klebstoffüberhang a. 27

Abb. 14: Schematische, stark vereinfachte Darstellung der Verschiebungen zwischen Substrat, Klebstoff und Faser. 28

Abb. 15: Schematische Darstellung der Spannungen und Kräfte am Substrat. 28

Abb. 16: Schematische Darstellung der Spannungen und Kräfte an der Faser. 29

Abb. 17: Darstellung der berechneten Dehnungsübertragungsrate bei verschiedenen Verklebungslängen des FBG-Dehnungssensors. 32

Abb. 18: Berechneter Einfluss der Klebstoffschichtdicke auf die Dehnungsübertragungsrate bei einer Verklebungslänge von L = 60 mm. 33

Abb. 19: Berechneter Einfluss des Klebstoffüberhangs auf die Dehnungsübertragungsrate bei Verklebung von L = 60 mm. 34

Abb. 20: Einteilung der Klebstoffe nach ihrem Aushärtungsmechanismus. 36

Abb. 21: Kraft-Eindringtiefe-Diagramm mit Belastungs- und Entlastungskurve des Klebstoffs Epotek 353ND. Dargestellt sind vier von elf durchgeführten Messungen. 45

Abb. 22: Messplatz der Firma Dantec Dynamics zur Bestimmung des CTE mittels digitaler 3D-Bildkorrelation. 48

Abb. 23: Gemessener Dehnungs-Temperatur-Verlauf in Längsrichtung (x) der Proben von zwei verschieden Klebstofftypen. Dargestellt ist sowohl die Aufheiz- als auch Abkühlphase. Von den Klebstoffen Epotek 353 ND und Loctite Hysol 3450 ist jeweils das Verhalten von zwei Proben graphisch dargestellt. 49

Abb. 24: Verlust- und Speichermodul des Klebstoffs Loctite Hysol 3450 in Abhängigkeit von der Temperatur bei 1 Hz. 51

Abb. 25: Darstellung der Glasübergangstemperatur des Klebstoffs Loctite Hysol 3450 als Funktion des Verlustmoduls E" und der beiden CTE aus der ermittelten Dehnung (vgl. Abb. 23)..... 52

Abb. 26: Gefügeschliffe von zwei applizierten FBG-Sensoren mit unterschiedlichen Klebstoffgeometrien. Oben: halb eingebettete Variante, unten: voll eingebetteter FBG-Sensor. 54

Abb. 27: Verhalten von FBG-Sensoren mit verschiedenen Coatings über einen Dehnungsbereich von 1,4 mm/m. Die FBG-Sensoren wurden mit Kyowa CC-33A appliziert. 59

Abb. 28: Verhalten von FBG-Sensoren mit verschiedenen Coatings über einen Dehnungsbereich von 1,4 mm/m bei einer Temperatur von 23 °C. Die FBG-Sensoren wurden mit Loctite 147 appliziert. 60

Abb. 29: FBG mit Acrylat-Coating mittels Loctite 147 appliziert. Bei T = -20 °C ist ein deutlicher Anstieg des Dehnungsübertragungskoeffizienten zu erkennen. 61

Abb. 30: Kalibrierdiagramm eines mit Ormocer® gecoateten FBG. Dargestellt ist die Änderung der Bragg-Wellenlänge über der Dehnungsänderung des DMS. Es ist die Abhängigkeit der Grund-Bragg-Wellenlänge von der scheinbaren Dehnung ε_S des Messobjekts bedingt durch die Temperatur zu erkennen. 62

Abb. 31: Ausgleichsgerade durch die Messwerte aus 6 Prüfzyklen bei 23 °C für einen FBG-Dehnungssensor mit Ormocer®-Coating, der mit Loctite 147 appliziert wurde. 64

Abb. 32: FBG-Dehnungssensoren mit Acrylat-Coating appliziert auf Aluminium mit Loctite 147. Schwarz: Vollflächige Verklebung des FBG, Rot: Punktuell links und rechts vom FBG verklebt. 65

Abb. 33: Änderung der Wellenlänge von Ormocer® gecoateten FBG-Sensoren bei Änderung der relativen Luftfeuchte. 67

Abb. 34: Darstellung und Vergleich der gemittelten Dehnungen aus dem Messsignal des FBG-Dehnungssensors, dem DMS und der 3D-Stereokorrelation, bei dem die Dehnung des Messobjekts (Substrat) und der Oberfläche der Glasfaser gemessen worden ist. 72

Abb. 35: Bestimmung des Dehnungsübertragungskoeffizienten bei Bezug der Wellenlängenänderung des FBG-Dehnungssensors (aus Abb. 34, entcoatetes FBG appliziert mit Loctite 147) auf die Dehnung des DMS und auf die Dehnung des Messobjekts. Dargestellt sind die Ausgleichsgeraden der Messwerte nach Ermittlung mit der 3D-Stereokorrelation 73

Abb. 36: Darstellung der mit der 3D-Stereokorrelation ermittelten mittleren Dehnungen des Messobjekts, des Klebstoffs Loctite 147 und der optischen Faser für unterschiedliche Belastungsstufen. Es ist zu erkennen, dass die optische Faser bei erhöhter Belastung eine geringere Dehnung erfährt. 74

Abb. 37: Falschfarbendarstellung der Verschiebungen in der opt. Faser, im Klebstoff und im Messobjekt bei einer Dehnung von 1400 µm/m. 75

Abb. 38: Bestimmung des Dehnungsübertragungskoeffizienten in Abhängigkeit der Bragg-Wellenlänge von der Dehnung des Messobjekts (also der Aluminiumoberfläche), ermittelt mit der 3D-Stereokorrelation. Der Dehnungsübertragungskoeffizient beträgt 0,60. 75

Abb. 39: Vergleich zwischen der Dehnung des DMS und der Dehnung aus der 3D-Stereokorrelation. Die Schwankungen in den Dehnungswerten des 3D-Stereokorrelations-Verfahrens resultieren aus dem starken Koordinatenrauschen. 76

Abb. 40: In-plane Messung mit dem ESPI Verfahren an einem verformten Messobjekt. Der Empfindlichkeitsvektor $\vec{s}$ steht parallel zur Messoberfläche. Der Verschiebungsvektor $\vec{v}$ zeigt in Richtung der Deformation des Messobjekts. Bildquelle: Firma Dantec Dynamics, Inc. 79

Abb. 41: Out-of-plane Beleuchtung eines Messobjekts. $\vec{o}$ ist die Wellenfront des Objektstrahls, der mit dem internen Referenzstrahl verglichen wird. Der Empfindlichkeitsvektor $\vec{s}$ steht senkrecht auf der Messobjektoberfläche während der Verschiebungsvektor $\vec{v}$ die Richtung der Deformation anzeigt. Bildquelle: Firma Dantec Dynamics, Inc. 80

Abb. 42: Darstellung der einzelnen Datenverarbeitungsschritte auf dem Weg von einem Specklemuster zur Berechnung der Verformung eines Messobjekts. Bildquelle: Firma Dantec Dynamics, Inc. 81

Abb. 43: Auf dem Foto des applizierten FBG-Dehnungssensors ist überlagernd die gemessene Verschiebung bei maximaler Belastung der optischen Faser relativ zum Messobjekt in Falschfarben dargestellt. Am Rand des Bildes sind die Koordinaten des Messfeldes x und y in mm aufgetragen. Die maximale Verschiebung der optischen Faser beträgt 3,89 µm. 82

Abb. 44: Ermittelte Dehnung des ESPI-Systems in Bezug auf die auf das Messobjekt aufgebrachte Kraft. Der Klebstoff wird gut vom Messobjekt mitgenommen und erfährt dieselbe Dehnung, während die optische Faser weniger Dehnung erfährt. 82

Abb. 45: Falschfarbendarstellung der Relativbewegung von optischer Faser, Klebstoff und Messobjekt. Die Größe des Messfeldes ist in x- und y- Richtung in mm angegeben. Zu erkennen ist, dass die Faser im oberen Messfeldbereich um 1,2 µm weniger Verformung erfährt als das Messobjekt. 83

Abb. 46: KALFOS-Anlage: Der Sensorkopf ESPI beleuchtet die eingespannte Probe. Im Hintergrund ist die verschiebbare Temperaturkammer zu erkennen. 86

Abb. 47: KALFOS-Aufbau mit 3D-Stereokorrelation als Referenzverfahren. 87

Abb. 48: Eingespanntes Messobjekt in KALFOS. Zu erkennen ist das schwarz-weiße fleckenartige Muster, das das Messfeld markiert. Auf dem Messobjekt sind drei FBG-Dehnungssensoren appliziert. Im Hintergrund ist ein Teil der Temperaturkammer zu erkennen. 87

Abb. 49: Zugprobe mit appliziertem FBG und DMS. 90

Abb. 50: Präparierte Zugprobe für Dehnungsmessung mit 3D-Stereokorrelation. Im hinteren Bereich des Bildes ist der DMS zu erkennen, vorn ist der FBG-Sensor appliziert. 90

Abb. 51: Vergleich zwischen der mit der 3D-Stereokorrelation ermittelten Probendehnung und der Dehnung der DMS. Dargestellt sind die Messergebnisse aller drei Proben. 91

Abb. 52: Verschiebungsfeld des DMS und der Probe. Auf den DMS wird bei erhöhter Last in der linken oberen Ecke nicht die vollständige Dehnung übertragen. Vermutlich löst sich der DMS von der Probe. 92

Abb. 53: Vergleich der Dehnungen zwischen Probe, Klebstoff und FBG. 93

Abb. 54: GFK-Patch mit integriertem FBG-Dehnungssensor, appliziert auf einer Zugprobe. 102

Abb. 55: Schematische Darstellung der Dichteänderung eines Epoxidharzes bei der Aushärtung [Wen05]. 103

Abb. 56: Aushärtungsvorgang eines Patches. Die Bragg-Wellenlänge des FBG ist als Funktion der Zeit und der Temperatur dargestellt. 104

Abb. 57: Änderung der Bragg-Wellenlänge über der Zeit bei 10 Belastungsstufen á 50 N. Die Bezugs-Bragg-Wellenlänge ohne Belastung beträgt 1550,99 nm. Nach der Belastung hat sich die Bezugs-Bragg-Wellenlänge auf 1551,157 nm erhöht. 105

Abb. 58: Änderung der Bragg-Wellenlänge über der aufgebrachten Kraft eines aus zwei vorgefertigten Hälften bestehenden Patches. 106

Abb. 59: Bestimmung des Dehnungsübertragungskoeffizienten K_ε = 0,85 für ein FBG-Patch aus der Änderung der Bragg-Wellenlänge gegenüber der Dehnungsänderung des Messobjekts gemessen mit DMS. 107

Abb. 60: Blick auf die Innenseiten des Stellvertreter-Rotorblatts mit den Anschlussboxen der Sensorketten. Die Sensorketten sind in den vier Gurtkanälen integriert, auf denen die beiden Stege aufgeklebt wurden. 109

Abb. 61: Gesamtansicht auf das Rotorblatt, das bereits für die Belastungsversuche in einer Prüfvorrichtung eingespannt wurde. Standort: Testlabor der BAM, Abteilung Bauwerkssicherheit. 110

Abb 62: Darstellung des Brechungsindexverlaufs über die Faserlänge z. Bildquelle: [Hof08]. 133

IX Abkürzungen und Formelzeichen

IX.1 Abkürzungen

CFK	Kohlenfaserverstärkter Kunststoff
CTE	Wärmeausdehnungskoeffizient
DMA	Dynamisch-mechanische Analyse
DMS	Dehnungsmessstreifen
E-Modul	Elastizitätsmodul
ESPI	Elektronische Specklemuster Interferometrie
FBG	Faser-Bragg-Gitter
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
LED	Leuchtdiode
OSA	Optischer Spektrumanalysator
TDM	Time Division Multiplexing
UV	Ultraviolett
WDM	Wavelength Division Multiplexing
2K-Epoxidharz	Zwei-Komponenten Epoxidharz

IX.2 Formelzeichen

A	Fläche
A_F	Querschnittsfläche der optischen Faser
A_S	Fläche des Messobjekts
a	Klebstoffbreite
C	Kontaktnachgiebigkeit
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
d	Durchmesser
$d_{Cladding}$	Durchmesser des Claddings
$d_{Coating}$	Durchmesser des Coatings
d_{Kern}	Durchmesser des Kerns der optischen Faser
d_K	Effektive Klebstoffschichtdicke
d_S	Dicke des Substrats
E	Elastizitätsmodul
E_F	Elastizitätsmodul der optischen Faser
E_{IT}	Elastischer Eindringmodul
E_r	Reduzierter Elastizitätsmodul des Eindringkontakts
E_S	Elastizitätsmodul des Messobjekts
E^*	Komplexer Elastizitätsmodul
E'	Speichermodul
E''	Verlustmodul
F	Kraft
F_F	Kraft, die auf die optische Faser wirkt
F_S	Kraft, die auf das Messobjekt wirkt
G	Schubmodul des Klebstoffs
h	Eindringtiefe
h_K	Klebstoffhöhe

K_ε	Dehnungsübertragungskoeffizient
K_T	Temperaturkoeffizient
k	k-Faktor
k_0	Wellenzahl im Vakuum
$\vec{L}_i$	Wellenvektor des einstrahlenden Lichts
l	Länge
n	Brechungsindex
$\overline{n}_{eff}$	Mittlerer effektiver Brechungsindex
$\vec{O}$	Wellenvektor des Objektstrahls
p_e	Photoelastische Konstante
$\lfloor p_{ij} \rfloor$	Photoelastische Matrix
R	Elektrischer Widerstand
$R_{p0,2}$	Dehngrenze
r_F	Radius der optischen Faser mit Cladding
$\vec{S}$	Empfindlichkeitsvektor
T	Temperatur
T_G	Glasübergangstemperatur
u	Verschiebung
u_F	Verschiebung der optischen Faser
u_S	Verschiebung des Messobjekts
$\ddot{U}_{BT}$	Übergangslänge zwischen Bauteil und Trägermaterial beim DMS
$\ddot{U}_{TM}$	Übergangslänge zwischen Trägermaterial und Messgitter beim DMS
$\vec{V}$	Verschiebungsvektor
α	Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE)
α_A	Absorptionskoeffzient
α_n	Thermo-optischer Koeffizient
α_P	Wärmeausdehnungskoeffizient des Messobjekts

β	Ausbreitungskonstante
γ	Gleitwinkel
δ	Phasenverschiebung
ε	Dehnung
ε_{B}	Bauteildehnung
ε_{F}	Dehnung der optischen Faser
ε_{M}	Dehnung des Messgitters des DMS
ε_{T}	Dehnung des Trägermaterials des DMS
ε_{S}	Dehnung des Messobjekts
ε_{r}	Dielektrizitätszahl
Θ	Winkel
Λ	Periode der Brechzahlmodulation
λ_0	Wellenlänge im Vakuum
λ_{B}	Bragg-Wellenlänge
λ_{B0}	Bezugs-Bragg-Wellenlänge
λ_{BG}	Grund-Bragg-Wellenlänge
λ_{UV}	Wellenlänge der UV-Strahlung
μ_{r}	Permeabilitätszahl
ν	Querkontraktionszahl
σ	Spannung
σ_{F}	Spannung in der optischen Faser
σ_{S}	Spannung im Messobjekt
τ	Schubspannung
ω	Kreisfrequenz

A Anhang

A.1 Experimentell ermittelte Dehnungsübertragungskoeffizienten aus kombinierten Last-Temperatur-Versuchen (vgl. Abschnitt II.4)

A.1.1 Verklebungsart: Vollflächig

Klebstoff: Kyowa CC-33A, Messobjekt: Al 2024

Temperatur	Ormocer® Coating	Acrylat Coating	Entcoatet
-60 °C	0,75	0,79	0,72
23 °C	0,73	0,65	0,7
85 °C	0,73	0,65	0,7

Klebstoff: Loctite 147, Messobjekt: Al 2024

Temperatur	Ormocer® Coating	Acrylat Coating	Entcoatet
-20 °C	0,67	0,66	0,65
23 °C	0,71	0,63	0,7
40 °C	0,72	0,63	0,6
50 °C	0,71	0,6	0,65
60 °C	0,74	0,64	0,69
70 °C	0,71	0,62	0,66
85 °C	0,72	0,63	0,66

Klebstoff: Weicon Easy Mix S, Messobjekt: Al 2024

Temperatur	Acrylat Coating
23 °C	1,56 (Pol. 2. Ordn.)

Klebstoff: Vishay M-Bond 200, Messobjekt: CFK

Temperatur	Ormocer® Coating, vorgespannt	Ormocer® Coating, nicht vorgespannt
-20 °C	0,80	0,80
-10 °C	0,80	0,80
23 °C	0,81	0,81
30 °C	0,80	0,80
40 °C	0,82	0,80
50 °C	0,67	0,80
65 °C	0,64	0,81

Klebstoff: Kyowa CC-33A, Messobjekt: CFK

Temperatur	Ormocer® Coating
-20 °C	0,78
-10 °C	0,78
23 °C	0,79
35 °C	0,79
50 °C	0,79
65 °C	0,79

A.1.2 Verklebungsart: Punktuell

Klebstoff: Kyowa CC-33A, Messobjekt: Al 2024,

Temperatur	Ormocer® Coating	Acrylat Coating	Entcoatet
23 °C	0,71	0,41	0,53
30 °C	0,66	0,35	0,41
40 °C	0,68	0,35	0,43

Klebstoff: Loctite 147, Messobjekt: Al 2024,

Temperatur	Ormocer® Coating	Acrylat Coating	Entcoatet
23 °C	0,82	0,61	0,53

Klebstoff: Weicon Easy Mix S, Messobjekt: Al 2024,

Temperatur	Acrylat Coating
23 °C	0,41
30 °C	0,34
40 °C	0,25
50 °C	0,26
60 °C	0,27
70 °C	0,29
80 °C	0,24

A.1.3 Vergleich der Dehnungsübertragungskoeffizienten ermittelt mit DMS und 3D-Stereokorrelation (vgl. Abschnitt III.1.1.1)

Klebstoff: Locite 147, Messobjekt: Al 2024, Temperatur: 23 °C

Referenzierung	Ormocer® Coating	Acrylat Coating	Entcoatet
DMS	0,833	0,601	0,794
3D-Stereokorrelation	0,788	0,600	0,767

Klebstoff: Kyowa CC-33A, Messobjekt: Al 2024, Temperatur: 23 °C

Referenzierung	Acrylat Coating	Entcoatet
DMS	0,754	0,873
3D-Stereokorrelation	0,751	0,828

A.2 Mathematische Darstellung des Brechungsindexes

Die Herleitung des Brechungsindexes ist in vielen Literaturstellen ausführlich beschrieben und wird an dieser Stelle zum besseren Verständnis aus [Jah01] kurz zitiert. Durch die Maxwellschen Gleichungen sind die Dielektrizitätszahl ε_r und der Brechungsindex n über die Permeabilitätszahl μ_r miteinander verknüpft:

$$n^2 = \varepsilon_r \cdot \mu_r . \tag{53}$$

Da die Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit von der Frequenz komplex ist, wird der Brechungsindex ebenfalls komplex. Somit kann dieser in einen Real- und in einen Imaginärteil aufgespaltet werden. Für dielektrische Materialien kann $\mu_r \approx 1$ gesetzt werden, so dass gilt:

$$\hat{n}^2 \approx \hat{\varepsilon}_r , \tag{54}$$

$$\hat{n} = n + \mathrm{i}n' , \tag{55}$$

$$\hat{\varepsilon}_r = n^2 - n'^2 + 2\mathrm{i}nn' . \tag{56}$$

Die Absorption ist bei Glasfasern bzw. Materialien, die zur Lichtausbreitung verwendet werden, sehr gering und kann daher mit $n' << n$ vernachlässigt werden.

$$\hat{\varepsilon}_r = \mathrm{Re}\{\hat{\varepsilon}_r\} + \mathrm{i}\,\mathrm{Im}\{\hat{\varepsilon}_r\} \approx n^2 + 2\mathrm{i}nn' . \tag{57}$$

An dieser Stelle wird der Absorptionskoeffizienten α_A eingeführt, der sich wie folgt ergibt:

$$\alpha_A = \frac{2\pi n'}{\lambda_0} = k_0 n' \tag{58}$$

Hierbei ist die Wellenzahl mit k_0 bezeichnet und die Wellenlänge im Vakuum mit λ_0. Aus den Gl. (57) und (58) kann man erkennen, dass der Imaginärteil der Dielektrizitätszahl mit dem Absorptionskoeffizienten verbunden ist:

$$\mathrm{Im}\{\hat{\varepsilon}_r\} = 2\frac{n}{k_0}\alpha_A . \tag{59}$$

Der Realteil der komplexen Dielektriziätszahl ist mit dem Brechungsindex verknüpft.
Mit der Kramers-Kronig-Beziehung kann gezeigt werden, dass zwischen Real- und Imaginärteil der Dielektrizitätszahl eine Integralbeziehung besteht. Für den Brechungsindex n und den Absorptionskoeffizienten α_A gilt durch die Kramers-Kronig-Beziehungen folgendes:

$$n(\omega) = 1 + \frac{1}{\pi}\int_0^\infty \frac{c_0 \alpha_A(\omega')\mathrm{d}\omega'}{\omega'^2 - \omega^2} , \tag{60}$$

$$\frac{c_0 \alpha_A(\omega)}{\omega^2} = -\frac{4}{\pi}\int_0^\infty \frac{n(\omega)-1}{\omega'^2-\omega^2}\mathrm{d}\omega. \tag{61}$$

Die Kreisfrequenz wird mit ω bezeichnet und c_0 ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Aus der Kramers-Kronig-Beziehung folgt, dass dispersive Materialien absorbieren und dass die Absorption frequenzabhängig ist. Ist der Imaginärteil der Dielektrizitätszahl, also die Absorption, bekannt, so lässt sich mit dieser Beziehung der Realteil, und damit der Brechungsindex, berechnen. Die Wellenzahl lässt sich ebenfalls in komplexer Form darstellen:

$$\hat{k} = nk_0 + \mathrm{i}\frac{\alpha_A}{2} = \beta + \mathrm{i}\frac{\alpha_A}{2}. \tag{62}$$

Dabei bezeichnet β die Ausbreitungskonstante, die sich in Faserrichtung ändert (Ausbreitung einer Phasenlage). Damit ergibt sich der effektive Brechungsindex n_{eff} zu

$$n_{\mathrm{eff}} = \frac{\beta}{k_0} \tag{63}$$

und liegt zwischen dem Brechungsindex des Kerns und des Claddings $n_{\mathrm{Clad}} < n_{\mathrm{eff}} < n_{\mathrm{Kern}}$. Dies gilt allgemein für geführte Moden in Stufenindex-Fasern.

In der Bragg-Grating-Theorie wird der mittlere effektive Brechungsindex $\overline{n}_{\mathrm{eff}}$ zur Berechnung der Bragg-Wellenlänge benötigt. Der mittlere effektive Brechungsindex wird dabei durch die Modulation des Brechungsindexes beim Einschreiben des Gitters bestimmt. Wird ein Gitter seitlich gleichförmig eingeschrieben, so entspricht der Verlauf des Brechungsindexes in Faserrichtung z im FBG Abb. 62.

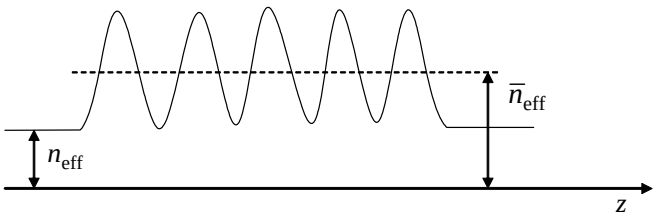


Abb 62: Darstellung des Brechungsindexverlaufs über die Faserlänge z. Bildquelle: [Hof08].

Durch Änderung der Einschreibparameter können neben gleichförmigen Faser-Bragg-Gittern auch sogenannte „chirped“ Gitter eingeschrieben werden. Dabei wird der mittlere effektive Brechungsindex zusätzlich durch eine z-abhängige Phasenänderung bestimmt. Bei gaußförmigen Brechungsindexänderungen kommt dann zusätzlich auch eine richtungsabhängige Änderung des Brechungsindexes hinzu.

A.3 Pockel-Koeffizienten

Die Abhängigkeit der Brechzahl von einer elektrischen Feldstärke bezeichnet man als elektro-optischen oder Pockels-Effekt. Die photoelastische Matrix $\left[p_{ij}\right]$ mit den Pockel-Koeffizienten ist nach [Ste97] wie folgt definiert:

$$\left[p_{ij}\right]=\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{12} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\ p_{13} & p_{23} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} \\ p_{14} & p_{24} & p_{34} & p_{44} & p_{44} & p_{46} \\ p_{15} & p_{25} & p_{35} & p_{45} & p_{55} & p_{56} \\ p_{16} & p_{26} & p_{36} & p_{46} & p_{56} & p_{66} \end{bmatrix}. \tag{64}$$

Für isotrope Materialien, wie einer optischen Faser, ergibt sich für die photoelastische Matrix folgendes [Ste97]:

$$\left[p_{ij}\right]=\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{p_{11}-p_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{p_{11}-p_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{p_{11}-p_{12}}{2} \end{bmatrix}. \tag{65}$$

Damit sind zur vollständigen Beschreibung der photoelastischen Matrix nur die beiden Pockel-Koeffizienten p_{11} und p_{12} notwendig.

Lebenslauf

Vivien Gisela Schlüter, geboren am 30. September 1981 in Mettmann

Beruflicher Werdegang

Seit Juni 2009	Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin, Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Juni 2006 – Juni 2009	Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin, Doktorandin in der Arbeitsgruppe VIII.14 „Faseroptische Sensorik“

Schulische und berufliche Ausbildung

Juni 2003 – Juni 2004	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasilien, Maschinenbau
Oktober 2000 – März 2006	Technische Universität Braunschweig, Maschinenbau, Abschluss: Diplom
August 1997 – Juni 1998	South Haven High School, Michigan, USA
August 1991 – Juni 2000	Konrad-Heresbach-Gymnasium, Mettmann, Abschluss: Abitur
August 1987 – Juni 1991	Katholische Grundschule Neanderstraße, Mettmann